

Computerexperimente: Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers

Gramelsberger, Gabriele

Veröffentlichungsversion / Published Version
Monographie / monograph

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:
transcript Verlag

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:


Gramelsberger, G. (2010). *Computerexperimente: Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*. (Science Studies). Bielefeld: transcript Verlag. <https://doi.org/10.14361/9783839409862>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY-NC-ND Lizenz (Namensnennung-Nicht-kommerziell-Keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY-NC-ND Licence (Attribution-Non Commercial-NoDerivatives). For more information see:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>



Gabriele Gramelsberger

Computerexperimente

Zum Wandel der Wissenschaft
im Zeitalter des Computers

[transcript] science studies

Gabriele Gramelsberger
Computereperimente

Gabriele Gramelsberger (Dr. phil.) lehrt Wissenschafts- und Technikphilosophie an der Freien Universität Berlin. Ihre Forschungsschwerpunkte sind der Wandel von Wissenschaft und Gesellschaft durch den Computer, Computersimulationen als neue Instrumente der Wissensproduktion, die ubiquitäre Informationsgesellschaft und die Philosophie der angewandten Mathematik.

GABRIELE GRAMELSBERGER

Computerexperimente

Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers

[transcript]

Das dieser Publikation zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 07 SPR 60 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin.



This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 3.0 License.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2010 transcript Verlag, Bielefeld

Die Verwertung der Texte und Bilder ist ohne Zustimmung des Verlages urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt auch für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und für die Verarbeitung mit elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Kordula Röckenhaus, Bielefeld

Umschlagabbildung: Gabriele Gramelsberger

Lektorat & Satz: Gabriele Gramelsberger

Druck: Majuskel Medienproduktion GmbH, Wetzlar

ISBN 978-3-89942-986-2

Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier mit chlorfrei gebleichtem Zellstoff.

Besuchen Sie uns im Internet: <http://www.transcript-verlag.de>

Bitte fordern Sie unser Gesamtverzeichnis und andere Broschüren an unter: info@transcript-verlag.de

INHALT

Vorwort	7
Einleitung	11

I HISTORISCHER KONTEXT

1 Rechnen – Motor der Wissenschaft und Technik	17
Rechnen als Kulturtechnik	18
Handwerk des Rechnens	23
Automatisierung des Rechnens	29
Numerische Simulation unbekannter Lösungen	32
2 Vom Experiment zum Computereperiment	39
Scientia experimentalis	44
Quantifizierung	50
Mathematisierung und Momentum	58
Mit Experimenten rechnen	69
John von Neumanns digitaler Windkanal	76
3 Entstehung der Computational Sciences	85
Mit Rechnern experimentieren	86
Computational Departments	92
e-Science	96

II WISSENSCHAFTSFORSCHUNG

1 Von einfachen Modellen zu Erdsystemen	105
Forschungsobjekt Atmosphäre	105
Synoptische Wetterkarten	110
Vilhelm Bjerknes Konzept einer Physik der Atmosphäre	114
Berechenbare Modelle der Atmosphäre	121
Von Wetter- zu Klimamodellen	127
Erdsysteme	137

2 Forschen mit Algorithmen	141
Wissenschaftliche Programmierung	141
In-silico Experimentalsysteme	145
Atmosphärenmodell	154
Rechnen als Experiment	157
Story Telling with Code	161
Fehlersuche im Modell	171
3 Professionalisierung der Modellierung	177
Standardisierung	178
Synchronisierung	184
Modell-komplexität	191
Evaluierung	194
Reshaping Science	197

III PHILOSOPHISCHE VERORTUNG

1 Computorexperimente	203
Allgemeine Bedingungen	204
Vergleichsbeispiele	211
Erkenntniswert	219
2 Denken in mathematischen Möglichkeitsräumen	233
Extreme Welten I	234
Extreme Welten II	241
Erweiterung der mathematischen Anschauung	248
3 Simulation als neue symbolische Form des Forschens	255
Symbolische Formen des Forschens	257
Von der Schrift zum Computer	263
Experimentalisierung der Mathematik	268
Sinnverschiebungen	275

Literatur	283
------------------	-----

VORWORT

Computer, wie sie uns heute vertraut sind, gründen in den Erfindungen des 16. und 17. Jahrhunderts: in der symbolischen Algebra von Francois Vieta, in der Verknüpfung von Geometrie und Algebra bei Rene Descartes und in den binären Rechenregeln von Gottfried W. Leibniz. All diesen Entwicklungen ist gemeinsam, dass sie den Zeichengebrauch formalisieren und regelbasiert in Form von Kalkülen operationalisieren. Es ist dann nur eine Frage der Zeit, bis Alan Turing Mitte des 20. Jahrhunderts mit seiner Idee der Turing-Maschine eine so allgemeine Praktik des Zeichengebrauchs konzipiert, dass jede in Form von Programmanweisungen explizierbare Zeichenmanipulation maschinell ausgeführt werden kann. Auch wenn Computer zu der Zeit eher Registriermaschinen gleichen, so sind mit Turings Idee, der von George Boole bereits 1847 beschriebenen Algebra und John von Neumanns Rechnerarchitektur die wichtigsten Komponenten zum Bau dieser grauen kleinen Kisten gelegt, obgleich es sich damals noch um Schränke gewaltigen Ausmaßes und echte Schreinerarbeit handelte.

Seither ist viel geschehen. Computer erobern in immer kleineren Ausführungen Institute, Fabriken, Büros und Wohnzimmer, verbesserte Visualisierungstechnologien transformieren die vormals grün-orangen Computerdialoge in die bunte Welt des Cyberspace und das Internet bringt die Vernetzung der Rechner mit sich. Die in die Computer implementierte Logik des Zeichengebrauchs hat sich mittlerweile weltweit durchgesetzt und prägt die Organisation von Arbeitsvorgängen, Kommunikationsbedingungen und Denkweisen. Diese Prägung und die sich daraus ergebenden Folgen für die Wissenschaft zu studieren, ist Thema dieses Buches. Dabei ist aus wissenschaftsphilosophischer Perspektive vor allem der Wandel der Wissenschaft in Computational Sciences inte-

ressant. Dieser Wandel zeigt sich in der zunehmenden Verwendung des Computers als in-silico Experimentalsystem und in der Durchführung von Computerexperimenten, auch Simulationen genannt. Diese Verwendungsweisen findet man mittlerweile in allen Disziplinen. Nirgends zeigt sich der Einfluss des Computers auf die Wissenschaft deutlicher als in den Computerexperimenten, denn er geht mit einer neuen Form der Wissensproduktion einher, welche die klassischen Methoden der Naturwissenschaften – Theorie, Experiment, Beobachtung, Messung – erweitert.

Die Folgen dieses Wandels wissenschaftlicher Wissensproduktion wirken sich zunehmend auf Gesellschaft und Alltag in Form neuer Technologien und Prognostiken aus. Prominentestes Beispiel sind wohl die Computerexperimente zur Erforschung des Klimas, die heutigen Gesellschaften nicht nur einen Spiegel ihrer problematischen Realexperimente mit dem Klima vorhalten und zum Handeln auffordern, sondern auch paradigmatisch die Möglichkeiten und die Grenzen computerbasierter Forschung aufzeigen. Andere Beispiele sind die Simulation neuer Materialien und Moleküle oder das simulationsbasierte Design und Engineering der Technikwissenschaften. Es sind genau diese Disziplinen, die in den aktuellen Wandel der Wissenschaften im Zeitalter des Computers involviert sind. Von daher stehen die Epistemik und Praktik wissenschaftlicher Simulationen, am Beispiel der Klimamodellierung, im Mittelpunkt dieser Untersuchung.

Die vorliegende Publikation gliedert sich in drei Teile: I. Die Rekonstruktion des historischen Kontexts der Computerexperimente, II. eine Computerlaborstudie zur Klimamodellierung in Deutschland und III. die philosophische Verortung der Computerexperimente und des Wandels wissenschaftlicher Wissensproduktion. Während in der historischen Rekonstruktion zahlreiche Wissenschaftler ihrer Zeit in Form von Zitaten zu Wort kommen, zeichnet die Computerlaborstudie anhand von Interviewausschnitten und Materialien ein Bild der aktuellen Forschungspraktiken in den Computational Sciences. Die abschließende philosophische Diskussion wiederum lässt die wissenschaftsphilosophischen und -theoretischen Einordnungsversuche der Simulation als neue Methode Revue passieren und fügt dieser eine eigene Verortung hinzu.

Die Publikation ist das Resultat von fünf Jahren Forschung im Rahmen des Forschungsprojekts „Computersimulationen – Neue Instrumente der Wissensproduktion“ (2004 bis 2007) an der Freien Universität Berlin sowie eines Gastaufenthaltes am Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg (2008). Das Forschungsprojekt war eines von zwölf Projekten der Förderinitiative „Science Policy Studies“ des BMBF Bun-

desministerium für Bildung und Forschung, die von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften koordiniert wurde. Die Computerlaborstudie zur Klimamodellierung in Deutschland wurde vor allem am Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg durchgeführt, am PIK Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum fünfundzwanzig Interviews sowie zahlreiche Gespräche mit Klimamodellierern und -modelliererinnen geführt. Für die Unterstützung und Förderung meiner Forschung möchte ich insbesondere Sybille Krämer (Freie Universität Berlin), Johann Feichter (Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg), Renate Mayntz, Ulrich Wengenroth und Monika Wächter (BMBF Förderinitiative „Science Policy Studies“) sowie den zahlreichen Interviewpartnerinnen und Interviewpartnern aus der Klimaforschung danken.

Berlin, September 2009

EINLEITUNG

„Serienweise kann die präzise
elektronische Phantasie der Automatenhirne
Gedankenexperimente ablaufen lassen und dabei
neue Theorien oder technische Konstruktionen
erproben – die Realisierung teurer
oder gefährlicher Experimente
ist nicht mehr nötig“
(Der Spiegel 1965: 115).

Elektronische Computer sind Anfang der 1960er Jahre noch keine zwanzig Jahre alten Erfindungen und gerade einmal so leistungsfähig wie heutige Taschenrechner. Dennoch kündigt sich bereits ein tiefgreifender Wandel der Wissenschaften an, der das Verständnis wissenschaftlicher Erfahrung revolutioniert. Die zunehmende Leistungsfähigkeit der Computer – von zehntausend Operationen pro Sekunde 1965 zu mehreren Billionen Operationen heutzutage – verändert die Experimentalkultur der Wissenschaften: Experimente finden immer öfter im Computer statt, und das digitale Labor wird in vielen Wissenschaftsdisziplinen dem Experimentallabor vorgeschaltet.

Historischer Kontext

Doch was sind Computereperimente? In welchem Zusammenhang stehen sie mit der bisherigen Experimentalkultur der Wissenschaften, mit Theorie, Messung und Beobachtung? Inwiefern revolutionieren sie die

wissenschaftliche Erfahrung und die Forschungslogik? Um diesen Fragen nachgehen zu können, werden Computerexperimente – numerische Berechnungen (Simulationsläufe) von algorithmierten Modellen – in einen größeren historischen Kontext eingeordnet. Denn mit der Herausbildung des neuzeitlichen Wissenschaftsverständnisses im 17. Jahrhundert formieren sich bereits die epistemischen Grundlagen heutiger Computerexperimente: Die Nutzung von Instrumenten, um neue Einsichten gewinnen und objektivieren zu können, die Verwendung der Mathematik als universelle Sprache der Wissenschaft und die Idee, durch Berechnung Vorhersagen treffen und Optimierungen erzielen zu können. Instrumentenbasierte Erkenntnis, mathematische Darstellungsweise und immer effizientere Berechnungsmethoden konvergieren in den 1940er Jahren mit der Mechanisierung und Automatisierung des Rechnens zu Computerexperimenten. Die Folge ist die zunehmende Transformation der Wissenschaften in Computational Sciences. Diese Entwicklung zeigt sich heute weltweit in der Entstehung von Computational Departments der Physik, der Chemie, der Biologie und anderer Disziplinen.

Trotzdem sich Computerexperimente in dieser historischen Tradition verorten lassen, brechen sie mit grundlegenden Bedingungen des empirischen Wissenschaftsverständnisses. Einer dieser Brüche besteht in der Nivellierung der ontologischen Differenz der material realisierten Experimente im Labor und der symbolischen Darstellungsweise der experimentellen Resultate. Indem das komplette Experimentalsystem ins Digitale des Computers transferiert wird, fehlt die materiale Widerständigkeit als Teil der experimentellen Anordnung wie auch als Evaluationskriterium der Resultate. Um Computerexperimente als wissenschaftlich valide Erkenntnismedien zu nutzen, müssen daher neue Evaluationsstrategien entwickelt werden. Eine weitere Bruchstelle ist wesentlich diffiziler, denn sie betrifft die Struktur wissenschaftlicher Erkenntnis selbst. Die Transformation ins Digitale des Computers bedeutet, Experimente unter dem Diktat von Algorithmen, diskreten Zuständen und rechnerischen Effizienzen zu gestalten, auszuführen und zu interpretieren. Dadurch sind Computerexperimente einer anderen Logik unterworfen als Experimente im Labor. Sie repräsentieren eine eigenständige epistemische Kultur der Wissensgenerierung. Da Computerexperimente relativ neue Erkenntnisinstrumente sind, ist es sinnvoll, diese vor Ort zu erforschen.

Vor Ort im Computerlabor

Die numerische Meteorologie ist bestens geeignet diese neue epistemische Kultur des Simulierens zu untersuchen. Wettermodelle gehören zu den ersten Computersimulationen, die Anfang der 1950er Jahre auf Rechnern wie ENIAC und NORC berechnet wurden. Die Meteorologie mit ihren Wettervorhersagen, und ab den 1960er Jahren mit Klimasimulationen, entwickelt sich seither zur führenden Simulationswissenschaft. Ähnlich der Astronomie des 17. Jahrhunderts bezüglich des neuen Umgangs mit wissenschaftlichen Instrumenten und mathematischen Methoden setzt die Meteorologie heute Standards für den Umgang mit der Simulation als neuem Erkenntnisinstrument. Dabei stellt sich die Frage, ob die codierte und computerprozessierte Weise der Erkenntnisgewinnung denselben Bedingungen unterliegt wie die traditionell naturwissenschaftliche Handhabung von Erkenntnissen, die ihre Wissensbestände in Form mathematisierter und quantifizierter, aber eben noch nicht algorithmierter und numerisch simulierter Weise gewinnt. Diese Frage zielt auf den epistemischen Kern des Wandels der Wissenschaft im Zeitalter des Computers. Es erscheint einleuchtend, dass ein weiterer Transformationsschritt sowie der mediale Wechsel zum Computer neue Bedingungen generieren. Welche dies sind, soll anhand eines konkreten Fallbeispiels aus der Klimamodellierung untersucht werden. Die Analyse der numerischen Meteorologie soll dabei nicht nur Einblicke in die Praktik und Epistemik der Computerexperimente geben, sondern auch Anhaltspunkte für eine Philosophie des Simulierens liefern, die den Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers zu erfassen im Stande ist.

Philosophische Verortung

Eine solche Philosophie des Simulierens hat die mathematischen und informatischen Bedingungen der Computerexperimente zum Untersuchungsgegenstand. Sie analysiert den Einfluss dieser Bedingungen auf die Forschungslogik und den wissenschaftlichen Erfahrungsbegriff. Dazu wird, basierend auf Ernst Cassirers *Philosophie der Symbolischen Formen*, der semiotische und epistemische Status der Computerexperimente untersucht. Weiter wird danach gefragt, ob sich die Veränderung des wissenschaftlichen Erfahrungsbegriffs in einem co-evolutionären Prozess auch nachhaltig auf unseren alltäglichen Erfahrungsbegriff auswirken wird. So wie Edmund Husserl bereits 1935 in seinem *Krisis* Vortrag die Sinnverschiebungen kritisierte, die in Form eines universalen Kausalstils der mathematisierten Wissenschaften als Apriori in unsere Le-

benswelt einprogrammiert sind, haben wir es heute mit weiteren Sinnverschiebungen aufgrund der simulierenden Wissenschaften zu tun. Welche Sinnverschiebungen dies sein werden, lässt sich aufgrund der fehlenden historischen Distanz nur andeuten. Aber die Bedingungen ihrer Möglichkeit lassen sich bereits heute untersuchen und in einer Philosophie des Simulierens formulieren.

I HISTORISCHER KONTEXT

1 RECHNEN – MOTOR DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

„It took me the best part of six weeks to draw up the computing forms and to work out the new distribution in two vertical columns for the first time. My office was a heap of hay in a cold rest billet. With practice the work of an average computer might go perhaps ten times faster. [...] If the coordinate chequer were 200 km square in plan, there would be 3200 columns on the complete map of the globe. In the tropics, the weather is often foreknown, so that we may say 2000 active columns, so that $32 \times 2000 = 64,000$ computers would be needed to race the weather for the whole globe. That is a staggering figure“ (Richardson 1922: 219).

Als Lewis Fry Richardson 1922 in seinem Buch *Weather Prediction by Numerical Process* einen Parallelcomputer entwarf, um das Wetter der nächsten Tage zu simulieren, ging er von menschlichen Computern aus: Jeweils ein Rechner sollte für die Kalkulationen eines Punktes des Berechnungsgitters zuständig sein. In seiner Wettervorhersagefabrik sollten 64.000 menschliche Computer per Hand die globale Wetterentwicklung berechnen, in der Hoffnung, dass sie nicht nur schneller rechnen als das tatsächliche Wetter sich entwickeln würde, sondern dass die Anzahl der menschlichen Rechner genügen würde, um eine ausreichend hohe Dichte an Berechnungen für aussagekräftige Prognosen zu erzielen. Denn je feiner das Berechnungsgitter einer solchen numerischen Simulation ist, desto genauer sind ihre Resultate. Eine höhere Auflösung des Berechnungsgitters geht jedoch mit einer enormen Erhöhung der dafür nötigen Berechnungen einher. Selbst mit 64.000 menschlichen Rechnern hätte Richardson seine Idee, das Wetter der nächsten Tage zu simulieren, wie es uns heute aus jedem Wetterbericht vertraut ist, nicht realisieren kön-

nen. Erst seit den 1970er Jahren, als die Computer entsprechend leistungsfähig wurden, sind solche numerischen Prognosen möglich. Diese Leistungsfähigkeit der Rechner, die aktuell bei Billionen von Operationen pro Sekunde liegt, erzeugt mittlerweile eine Dichte an Berechnungen, die ausreicht, um den Computer als digitales Labor für Experimente zu nutzen. Heutige Supercomputer halten nicht nur Schritt mit dem realen Wetter, sie berechnen die Klimaentwicklung über einen Zeitraum von Jahrzehnten innerhalb weniger Tage, sie designen neue Moleküle und Materialien, lassen Flugzeuge und Autos crashen. Mit diesen automatisierten Rechenmaschinen blicken Forscher in die Zukunft und optimieren die Natur. Sie machen bislang unsichtbare Welten sichtbar und führen eine neue Logik und Praktik des Forschens in Wissenschaft und Technik ein. In diesem Sinne war Richardsons Idee visionär, denn mit seiner Wettervorhersagefabrik entwarf er – basierend auf numerischen Simulationen, parallel arbeitenden Recheneinheiten und berechneten Vorhersagen – ein modernes Wissenschaftsszenario, wie es heute in vielen mathematisierten Natur- und Ingenieurwissenschaften, den so genannten Computational Sciences, zu finden ist.

Rechnen als Kulturtechnik

Grundlage dieses modernen Wissenschaftsszenarios ist die Erfindung der Zahl und des Rechnens. Die Entwicklung bis hin zu den numerischen Simulationen von heute macht deutlich, dass das Rechnen eine der einflussreichsten Kulturtechniken des Menschen ist.¹ Zahlen spielen seit Jahrtausenden in jeder Kultur eine wichtige Rolle, sei es zum Registrieren von Waren, zur Bestimmung astronomischer Ereignisse oder zur Dokumentation klimatischer Regelmäßigkeiten. Um Vorräte und andere Wirtschaftsgüter zu registrieren, wurden anfangs Zählsteine oder Zähl-

1 „Kulturtechnik befördert die Leistungen der Intelligenz durch Versinnlichung und exteriorisierende Operationalisierungen des Denkens. [...] Kulturtechniken sind (1) operative Verfahren zum Umgang mit Dingen und Symbolen, welche (2) auf einer Dissoziation des impliziten ‚Wissens wie‘ vom expliziten ‚Wissen, dass‘ beruhen, somit (3) als ein körperlich habitualisiertes und routiniertes Können aufzufassen sind, das in alltäglichen, fluiden Praktiken wirksam wird, zugleich (4) aber auch die ästhetische, material-technische Basis wissenschaftlicher Innovation und neuartiger theoretischer Gegenstände abgeben kann. Die (5) mit dem Wandel von Kulturtechniken verbundenen Medieninnovationen sind situiert in einem Wechselverhältnis von Schrift, Bild, Ton und Zahl, das (6) neue Spielräume für Wahrnehmung, Kommunikation und Kognition eröffnet“ (Bredekamp, Krämer 2003: 18).

kugeln verwendet, die in Lederbeuteln und später in versiegelten Tongefäßen aufbewahrt wurden. Als man begann, auf die Außenseite der Tongefäße Zeichen für die Anzahl der Kugeln in den Gefäßen zu ritzen, hatte man die Zahlen als symbolische Darstellungen von Einheiten erfunden. Diese Abstraktionsleistung – materiale Äquivalente für Wirtschaftsgüter (Zählsteine und -kugeln) in symbolische Notationen zu übersetzen – stellte vor gut achttausend Jahren nicht nur eine Medienwende vom Materialen zum Symbolischen dar, sondern den Ursprung von Schrift generell. Denn nachdem sich „die Verfahren des Zählens und des Referierens graphisch voneinander emanzipiert haben, spricht jetzt in der Tat nichts mehr dagegen, Referenten, die nicht gezählt werden sollen, – außerhalb des pragmatischen Zwecks der Registrierung – graphisch zu symbolisieren, also graphische Symbole für immer mehr pragmatische Zwecke und für immer mehr sprachliche Zeichen zu entwickeln“ (Koch 1997: 56).

Der nächste fundamentale Schritt bestand dann in der Erfindung der Zählreihen. Indem einzelne Zeichen (Ziffern) aneinandergereiht wurden, ließen sich auf diese Weise neue Zahlen erzeugen.² Ziffersysteme, wie das römische, das sich in Europa im 5. Jahrhundert v. Chr. etablierte, dokumentieren eindrucksvoll diese neue Möglichkeit, mit Symbolen operativ zu hantieren: Mit wenigen Ziffern lässt sich eine große Menge an Zahlen erzeugen. Der Zahlenraum, der sich dadurch eröffnete, überstieg nicht nur die Anzahl alltäglicher Güter. Er dehnte als Idee der Konstruierbarkeit unendlich vieler Zahlen das menschliche Denken in neue und abstrakte Bereiche aus, die in ihrer Unendlichkeit bis dahin allein dem mythischen Denken vorbehalten waren. Diese Ausdehnung ins Abstrakte, als das dem Gegenständlichen nicht Verhaftete und daher ins Unendliche Verlängerbare, konstituiert bis heute den Objektbereich der Mathematik.

Ziffersysteme ermöglichen jedoch nicht nur die Konstruktion beliebig vieler Zahlen, sie animieren auch dazu, Anzahlen zu addieren oder zu subtrahieren, also einfache Berechnungen durchzuführen. Dabei zeigte sich bald die Unhandlichkeit des römischen Ziffersystems, dessen

2 „Seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. sind uns Dokumente überliefert, aus denen zu schließen ist, daß verschiedene antike Hochkulturen unabhängig voneinander Zählreihen durch Zählssysteme bildeten, in denen nicht nur ein und dasselbe Zeichen fortlaufend aneinandergesetzt, sondern Zeichengruppen gebildet und diese durch Individualzeichen ersetzt wurden: die Zählreihe ist mit Hilfe von Ziffern gebildet“ (Krämer 1988: 9).

Zählreihen sehr lang und daher unübersichtlich werden konnten.³ Um mit römischen Ziffern rechnen zu können, musste auf Hilfsmittel wie Rechensteine, Rechenkugeln oder Rechenbretter zurückgegriffen werden. Diese Unhandlichkeit machte das Rechnen zu einer Kunst, die eine entsprechende Ausbildung voraussetzte und die damit das Rechnen für lange Zeit einer gebildeten Elite vorbehielt. Doch gesellschaftliche Veränderungen im frühen Mittelalter, insbesondere militärische und ökonomische Entwicklungen, führten zu einem wachsenden Bedarf an Berechnungen und ließen das Rechnen mit römischen Ziffern an seine Grenzen stoßen. Es bedurfte eines neuen Ziffernsystems, um das Rechnen effizienter und einfacher zu gestalten. Als Leonardo Fibonacci 1209 in seiner Schrift *Liber Abaci* das indisch-arabische Ziffernsystem in Europa bekannt machte, führte er damit nicht nur ein neues Zeichensystem ein, sondern transformierte das Rechnen vom Materialen ins Symbolische. Aufgrund seiner Besonderheit mit nur wenigen Ziffern auskommen, erlaubte es das indisch-arabische Ziffernsystem, Berechnungen im Medium der Ziffern selbst, also auf Papier auszuführen und machte dadurch Rechenbretter oder Rechensteine überflüssig. Damit war die erste Medienwende vom Materialen zum Symbolischen – die Jahrtausende zuvor mit der Ablösung von Zählkugeln durch Zahlzeichen begonnen hatte – abgeschlossen. Die zweite Medienwende, vom Papier zum Computer, sollte gut achthundert Jahre später stattfinden.

Doch obwohl Fibonacci das indisch-arabische Ziffernsystem und das Rechnen auf Papier bereits 1209 beschrieben hatte, dauerte es weitere dreihundert Jahre, bis sich diese neue Kulturtechnik in Europa vollständig durchgesetzt hatte. Ein Grund dafür war die Ziffer Null, die dem römischen Ziffernsystem unbekannt war.⁴ Die Null wurde in Indien bereits im 9. Jahrhundert als die Symbolisierung des Nichts eingeführt und ermöglichte es, die bis heute gültigen Rechenregeln der vier Grundrechenarten zu entwickeln. Das indisch-arabische Ziffernsystem konnte dank der Null ein neues Prinzip der Konstruktion von Zahlen entwi-

3 Um die römischen Zahlen nicht beliebig lang werden zu lassen, mussten Zahlen immer wieder zu Individualzeichen zusammengefasst werden: I (1), V (5), X (10), L (50), C (100), D (500), M (1.000), etc.

4 Die Null symbolisiert das Nichts, das in Indien mit dem Nirwana gleichgesetzt eine positive Konnotation hatte, im christlichen Europa des Mittelalters jedoch negativ besetzt war. Trotz des heftigen Kampfes der katholischen Kirche gegen die neue Rechenkunst gewannen das indisch-arabische Zahlensystem und das Rechnen auf Papier aufgrund seiner Praktikabilität zunehmend an Bedeutung. Populäre Rechenbücher wie *Rechnung auff der linihen* von Adam Ries aus dem Jahr 1518 und Rechenschulen brachten die neue Kunst des Rechnens unter das Volk (vgl. Folkerts 1997; Menninger 1958).

ckeln: das Stellenwertprinzip.⁵ Dieses Prinzip besteht nicht in der endlosen Aneinanderreihung von Zahlzeichen, die schließlich zu enorm langen Zahlendarstellungen führten wie mit römischen Ziffern. Das Stellenwertprinzip basiert lediglich auf zehn Individualzeichen (0 bis 9), wobei die Position der Zeichen – als Einer, Zehner, Hunderter, etc. – den Wert einer Zahl erzeugt. Anstatt Zeichen aneinanderzureihen wird nun die Konstruktion von Zahlen mit Hilfe eines Alphabets einiger weniger Ziffern formalisierbar. Formalisierung ist immer dann gegeben, wenn auf Basis endlich vieler Zeichen und expliziter Regeln beliebig viele neue Zeichen hergestellt werden können, ohne dazu das Alphabet vergrößern zu müssen. Das römische Ziffernsystem basierte zwar auf einer expliziten Regel, das Aneinanderreihen von Einheiten, aber die Individualzeichen müssen erweitert werden, will man größere Zahlen konstruieren. Im Unterschied dazu funktioniert das indisch-arabische Ziffernsystem, dank der Null und dem Stellenwertprinzip, wie eine ‚symbolische Maschine‘ (vgl. Krämer 1988, 1991), die aus wenigen Komponenten beliebig viele Variationen herstellen kann. Dies ist die Voraussetzung, um auch das Rechnen auf Papier formalisieren zu können.⁶ Dazu muss jedoch die Fläche des Papiers genutzt werden, indem man die zu addierenden oder zu subtrahierenden Zahlen untereinander schreibt und bei der senkrechten Spalte der Einer beginnend, von rechts nach links, die Zahlenwerte zusammenzählt oder voneinander abzieht. Diese Rechenteknik, heute jedem Schulkind vertraut, wurde 1209 von Fibonacci erstmals in Europa demonstriert und später – als Rechnen auf der Linie bezeichnet – durch Rechenmeister wie Adam Ries verbreitet (vgl. Ries 1518). Fibonacci selbst nutzte das neue Ziffernsystem, um die Folge der so genannten Fibonacci-Zahlen zu studieren. Diese Folge entsteht, wenn man eine Zahl mit der jeweils vorausgehenden Zahl addiert: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, usw.

Das Rechnen mit natürlichen Zahlen führte jedoch schnell zu neuen Zahlen. Bereits die Subtraktion einer größeren von einer kleineren Zahl sprengt den Raum natürlicher Zahlen und dehnt ihn jenseits der Null in

5 „The world suffered long for lack of positional numeration, and for a symbol for zero. Neither of these were invented by formalists. Both were the product of instrumental analysis. They came as the direct and inevitable result of the use of the abacus. [...] The mechanical fact that it [Abakus] is convenient to mount rods or wires parallel to one another in a frame produced the idea of positional numeration, and the necessity for noting down complete absence of counters under such circumstances gave us the zero” (Bush 1936: 650).

6 Beim Medienwechsel vom Papier zum Computer werden sich die zehn Zeichen des indisch-arabischen Ziffernsystems (0 bis 9) auf zwei Zustände (0, 1 materialisiert als on/off) reduzieren.

den Bereich negativer Zahlen aus. Dieser Ausdehnungsprozess setzt sich mit der Division fort und spaltet die ganzen Zahlen in Teile auf, die sich in einer neuen Unendlichkeit – zwischen zwei ganzen Zahlen eingebettet (z.B. $1:3 = 0,33333\dots$) – verlieren.⁷ Was mit dem Registrieren von Warengütern und Rechenkugeln im Konkreten begann, entwickelte sich ab dem Mittelalter zu einer Kulturtechnik, welche die Zahlen und das Rechnen von realweltlichen Bezügen ablöste. Das Rechnen verselbständigt sich zu einem rein formalen Prinzip und erhält dadurch eine Autonomie, welche die Mathematik bis heute in die Lage versetzt, die Zahlen und Rechenoperationen in neue und immer abstraktere Bereiche zu erweitern. Dabei gelangt die Mathematik von den natürlichen zu den ganzen Zahlen, von den rationalen und den reellen zu den komplexen Zahlen, von Quaternionen und den hyperreellen zu den surrealen Zahlen (vgl. Landau 1984).

Diese Autonomie der Zahlen und des Rechnens findet einen ersten Höhepunkt bei Francois Vieta, der im 16. Jahrhundert die Algebra – das Rechnen mit Buchstaben und Formeln – entwickelte (vgl. Klein 1992). Gefolgt von René Descartes, der im 17. Jahrhundert Algebra und Geometrie miteinander verknüpfte, indem er ein Koordinatensystem in die Geometrie einführte. Durch diese Metrisierung wurden die geometrischen Objekte berechenbar. In der *Geometrie* schrieb Descartes 1637: „Und ich werde mich nicht scheuen, diese der Arithmetik entnommenen Ausdrücke in die Geometrie einzuführen, um mich dadurch verständlicher zu machen“ (Descartes 1637/1981: 1). Mit dieser Algebraisierung der Geometrie bereitete Descartes sowohl der Anschaulichkeit der Geometrie ein Ende, als auch ihrer Beweiskraft basierend auf der geometrischen Konstruktion. Der Beweis durch Konstruktion hatte seit Euklids Werk *Die Elemente* 325 v. Chr. als Wissenschaftsideal gegolten, das bis weit ins Mittelalter vorherrschte. Die griechische Mathematik, die auf einem geometrischen Zahlenverständnis und der axiomatisch-deduktiven Methode der Beweisführung basierte, stellte Zahlen grafisch als Strecken dar. Die Entdeckung der Inkommensurabilität zweier Strecken als Verhältnis einer Seite zur Diagonale eines Quadrats und die Folgerung, dass sich beide Strecken nicht wie rationale Zahlen zueinander verhalten, stärkte die Vorrangstellung der Geometrie gegenüber der Arithmetik. Nichts Geometrisches durfte, so das Dogma der griechi-

7 „Im 16. und z.T. im 17. Jh. haben sich nicht nur die Brüche und irrationalen Zahlen, sondern auch die Null, die negativen und die komplexen Zahlen in der Algebra durchgesetzt, und sie werden auch alle als Zahlen behandelt, d.h. man führt mit ihnen die üblichen Rechenoperationen durch“ (Gericke 1970: 68).

schen Mathematik, durch die Arithmetik bewiesen werden.⁸ Dies schränkte jedoch den Bereich der Algebra erheblich ein, da Ausdrücke wie a^4 , die sich geometrisch nicht konstruieren ließen, nicht zulässig waren. Descartes analytische Geometrie hingegen erlaubte Ausdrücke wie a^4 , die den dreidimensionalen Anschauungsraum sprengten und die Konstruierbarkeit geometrischer Objekte durch ihre Berechenbarkeit ersetzte. Damit sicherte er im Europa des 17. Jahrhunderts dem Rechnen gegenüber der Geometrie die Vorherrschaft. Für die Entwicklung der neuzeitlichen und modernen Wissenschaft war diese Vorherrschaft der Algebra von entscheidender Bedeutung.

Handwerk des Rechnens

1623 behauptete Galileo Galilei in seiner Schrift *Saggiatore*, dass das Buch der Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben sei. Doch um dieses Buch entschlüsseln zu können, bedurfte es langwieriger Berechnungen per Hand. „It is this,“ konstatierte der Philosoph und Mathematiker Gottfried Wilhelm Leibniz, „that deters them from computing or correcting tables, from the construction of Ephemerides, from working on hypotheses, and from discussions of observations with each other. For it is unworthy of excellent men to lose hours like slaves in the labour of calculation which could safely be relegated to anyone else if machines were used“ (Leibniz 1685, übersetzt in: Goldstine 1993: 8). Von daher verwundert es nicht, dass ein Kollege Keplers, der Astronom Wilhelm Schickard 1623 die erste mechanische Rechenmaschine konstruierte, die alle vier Rechenarten ausführen konnte, wie er euphorisch in Briefen an Kepler schrieb (vgl. Seck 1978). Allerdings wurde Schickards Maschine bei einem Feuer zerstört, so dass nur Konstruktionszeichnungen erhalten sind. Daher ist es die 1642 von Blaise Pascal gebaute Pascaline, die als erste funktionstüchtige Rechenmaschine in die Geschichte einging, auch wenn sie nur die Addition und Subtraktion beherrschte. Obwohl die Idee, mechanische Rechenmaschinen zu bauen, seit dem 17. Jahrhundert die Wissenschaft beherrschte, konnte der Traum vom mechanischen Rechnen bis ins 20. Jahrhundert nur für die Grundrechenarten verwirklicht werden.⁹ Da solche Rechenmaschinen in

8 Dieser griechische Denkstil wird jedoch nicht strikt eingehalten und von Mathematikern wie Diophant von Alexandrien durchbrochen.

9 Leibniz entwarf eine Rechenmaschine basierend auf einer Staffelwalze, mit der alle vier Grundrechenarten ausgeführt werden konnten. Er präsentierte seine Maschine, die heute im Landesmuseum Hannover ausgestellt ist, 1675 der Pariser Académie Royale des Sciences. Später stellte er Re-

der Regel Einzelstücke waren, musste sich die Mehrheit der Forscher mit anderen Hilfsmitteln zufrieden geben. Um jedoch den ständig zunehmenden Bedarf an Berechnungen, der allein auf Papier nicht mehr effizient durchführbar war, zu bewältigen, wurde seit dem Mittelalter eine Vielzahl von mathematischen Hilfsmitteln entwickelt. Sie basieren auf zwei Traditionen des Rechnens: Der numerischen Berechnung auf Basis des indisch-arabischen Ziffernsystems und auf der grafischen Konstruktion von Zahlen basierend auf geometrischen Verfahren.

Für das Rechnen mit Zahlen wurden seit der Antike Hilfsmittel wie der Abakus, Rechensteine und Rechentücher benutzt. Als John Napier 1614 eine neue Rechentechnik, die er Logarithmus nannte, in Europa einführte, vereinfachte er damit das Rechnen mit Zahlen ganz entscheidend. Der Logarithmus ist die Umkehrung der Exponentialfunktion und ermöglicht es, die Division auf Subtraktion und die Multiplikation auf Addition zurückzuführen.¹⁰ Bereits drei Jahre später veröffentlichte der Mathematiker Henry Briggs die ersten logarithmischen Tabellen, die er mit Hilfe von Napiers Rechenstäbchen berechnet hatte. Diese Tabellen ersparten die Mühe des Ausrechnens für einfachere Anwendungen und entwickelten sich zu weit verbreiteten Hilfsmitteln, die bereits hundert Jahre später zu Nachschlagewerken mit Millionen von Zahlen angewachsen waren. Beispielsweise enthielt der *Thesaurus Logarithmorum Completus* von Juri Vega Mitte des 18. Jahrhunderts bereits mehr als zwei Millionen Zahlen (vgl. Whittaker, Robinson 1967). Zehn Jahre nach Napiers Einführung des Logarithmus entwickelte der Mathematiker Edmund Gunter eine logarithmisch angeordnete Skala, die auf einen Stab übertragen den bis dahin einfachen Rechenschieber als mechanisches Hilfsmittel weiterentwickelte. Dabei wurden zwei Skalen auf zwei Stäben so angeordnet, dass man sie gegeneinander verschieben und Berechnungen ausführen konnte (vgl. Gunter 1624, Mayer 1908). Loga-

chenregeln für die Kalkulation mit Binärzahlen auf und entwarf einen mechanischen Digitalcomputer, den er jedoch nie baute (vgl. Leibniz 1703).

- 10 Darüber hinaus sind Logarithmen geeignet, um Integrale und Gleichungen mit unbekannten Exponenten zu berechnen. 1614 publizierte John Napier seine Schrift *Mirifici logarithmorum canonis descriptio ejusque usus in utraque trigonometria etc.* und führte damit das Rechnen mit Logarithmen ein. Hilfsmittel wie Napiers Rechenstäbchen erleichterten das Rechnen per Hand erheblich (vgl. Bryden 1992; Gladstone-Millar 2003). Ohne diese neue Rechentechnik hätte Johannes Kepler seine Berechnungen des Marsorbits, für die er vier Jahre benötigte, kaum zu seinen Lebzeiten schaffen können. Allerdings basierten Keplers Kenntnisse auf den Logarithmentafeln von Jost Bürgi, der diese parallel zu Napier entwickelt hatte. Kepler selbst schrieb 1611 ein Lehrbuch mit Tafeln, das 1624 unter dem Titel *Chilias logarithmorum* veröffentlicht wurde.

rithmische Tabellen und Rechenschieber gehörten bis Mitte des 20. Jahrhunderts zu den weit verbreitetsten mathematischen Hilfsmitteln, die in jedem Laboratorium und Ingenieurbüro zu finden waren, bevor elektronische Computer und Taschenrechner die Vielfalt der Rechenmethoden und -instrumente eliminierte.

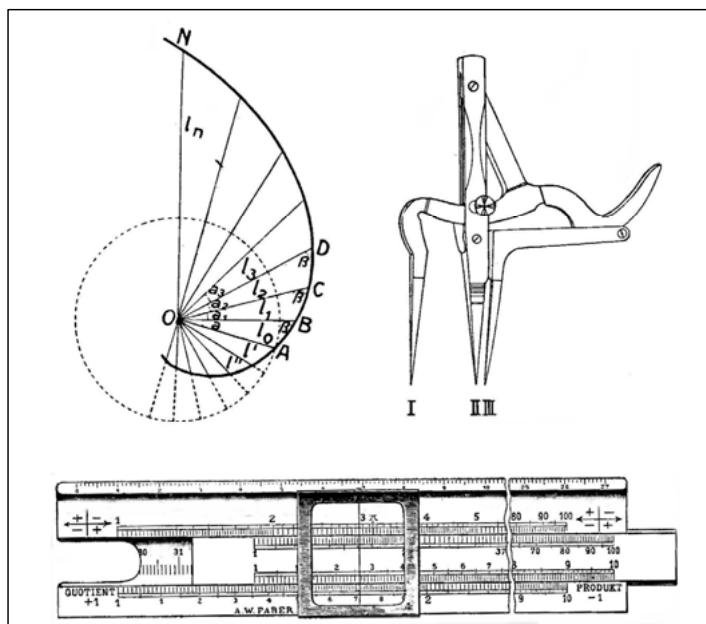


Abbildung 1: Logarithmische Spirale, logarithmischer Zirkel und logarithmischer Rechenschieber (Mayer 1908: 99, 102, 22)¹¹

Eine ganz andere Methode, Berechnungen per Hand auszuführen, war das grafische Rechnen. Mit Zirkel, Lineal, Maßstab und anderen Zeichengeräten wurden reelle Zahlengrößen durch Strecken dargestellt. Neben der geometrischen Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division ließen sich grafisch auch das Potenzieren und Radizieren ausführen. Im Laufe der Zeit entwickelten sich immer komplexere mechanische Apparate, um anspruchsvollere Rechenoperationen zu lösen. Es entstanden ästhetische Konstruktionen wie die logarithmische Spirale (s. Abbildung 1), die zum Radizieren von Quadratwurzeln diente und bereits von René Descartes und Jakob Bernoulli untersucht wurde (vgl. Archibald 1918). Das grafi-

11 Das Deutsche Museum in München verfügt über eine der umfangreichsten Sammlungen mathematischer Instrumente weltweit.

sche Rechnen basierte auf der Verschmelzung von Geometrie und Algebra durch Descartes und brachte faszinierende Bilder hervor, welche die Ästhetik mathematischer Strukturen sichtbar machte. Diese Ästhetik der Mathematik hat bis heute nichts von ihrer Faszination verloren.

Trotz der Vielzahl verschiedener Methoden ließ sich das Rechnen bis Mitte des 20. Jahrhunderts nur teilweise an Maschinen und Hilfsmittel delegieren. Nichtsdestotrotz wurden Berechnungen zum Motor wissenschaftlicher und technischer Entwicklung, seit die Astronomen des Mittelalters mathematische Strukturen auf Naturvorgänge übertragen hatten. Allerdings widerspricht die damals angewandte Mechanik des Rechnens unserem heutigen Verständnis von Exaktheit. Grafische und logarithmische Rechenmethoden waren Näherungsverfahren. Die Exaktheit der Berechnungen war durch die Rechenmethoden, die Mechanik der Hilfsmittel und die Erfahrung des rechnenden Wissenschaftlers oder Ingenieurs begrenzt. Rechnen war ein Handwerk, dessen Güte an die taktile Geschicklichkeit und sinnliche Wahrnehmung gebunden war. „Die Benutzung des Rechenschiebers erfordert die richtige Schätzung von Abständen und da bildet ein Abstand von 0,1 mm etwa die Grenze des mit bloßem Auge Erkennbaren. Beim Einstellen oder Ablesen einer Zahl wird also ein mittlerer Längenfehler von 0,1 mm zu erwarten sein“ (Runge/König 1924: 11).¹² Allerdings ließen sich „bei großer Übung und langsamerem Rechnen [...] die Genauigkeitsergebnisse selbstredend bedeutend steigern. [...] Andererseits muß sich der weniger Geübte mit schlechteren Resultaten begnügen“ (Mayer 1908: 34). Die fortschreitende Entwicklung in Wissenschaft und Technik ließ jedoch nicht nur den Bedarf an Rechenpersonal immens steigen, sie erforderte auch immer exaktere Berechnungen. Daher lag die Idee einer Maschine in der Luft, die „[exact] algebraic patterns, just as the Jacquard-loom weaves flowers and leaves“ (Lovelace 1842) erzeugen konnte, als Charles Babbage 1822 die Konstruktion seiner Difference Engine und später der komplexeren Analytical Engine begann. Motiviert wurde er durch die hohe Fehlerquote in den logarithmischen Tabellen. „I am thinking that all these tables (pointing to the logarithms) might be calculated by machinery“ (Babbage 1989: 30, 31). Sein Konzept kam dabei den Entwürfen moderner Computer erstaunlich nahe: Babbage konzipierte mit der Analytical Machine einen frei programmierbaren Rechner, der zwischen Daten und Programm unterschied, und der über die 1805 von Joseph-Marie Jacquard für Webstühle entwickelten Lochkarten programmiert werden

12 Die Genauigkeit der graphischen Methoden basierte auf der Erkennbarkeit der markierten Koordinaten. Die Exaktheit der Logarithmen wurde durch die Länge der Rechenschieber begrenzt, der durchschnittlich siebenundzwanzig Zentimetern lang war und zu einem Fehler von 1/1250 führte.

sollte, wie es für die Digitalrechner bis in die 1960er Jahre üblich war. 1843 schrieb Ada Lovelace den ersten maschinentauglichen Algorithmus für Babbages Rechner. Aufgrund der Begrenzungen der Feinmechanik seiner Zeit konnte Babbage die Analytical Machine jedoch nie bauen und es gelang ihm auch nur drei Exemplare der Difference Engine zu realisieren, die jedoch alle nicht funktionstüchtig waren.

**Die Rechenmaschine
„MILLIONÄR“**



ist die

leistungsfähigste Rechenmaschine der Welt

weil für jede Multiplikator- oder Quotientenstelle **nur eine Kurbeldrehung** erforderlich ist, bei gleichzeitiger **automatischer** Verschiebung des Resultates

Beispiele:

$18\,769\,423 \times 23\,769\,814 = 446\,145\,693\,597\,322$
kann mittelst 8 Kurbeldrehungen in 6–7 Sekunden
 $18\,769\,423 \times 55\,555\,555 = 1\,042\,745\,711\,794\,765$
multipliziert werden. in 3–4 Sekunden

Größte Übersichtlichkeit, weil sowohl beide Faktoren als auch das Resultat in geradliniger Anordnung gedrängt beisammen erscheinen. — Zehnertransport durch die ganze Resultatreihe. — Einfache Auslöschvorrichtungen. — Solideste und sorgfältigste Ausführung.

Referenzenliste und Prospekte durch
HANS W. EGLI, Rechenmaschinenfabrik, ZÜRICH (Schweiz)

Abbildung 2: Werbung für eine Rechenmaschine,
um 1900 (Mayer 1908: Anhang)

Es waren also nach wie vor einfachere Rechenmaschinen, wie in Abbildung 2 dargestellt, die für den alltäglichen Rechenbedarf an Grundrechenarten eingesetzt wurden. Im 18. Jahrhundert noch als Einzelexemplare in Handwerksbetrieben gebaut, entwickelte sich im 19. Jahrhundert eine blühende Industrie für mathematische Geräte. Beispielsweise produzierten die Thomas Werkstätten in Colmar mit dem Arithmometer den ersten mechanischen Tischrechner in Serie und lieferten bis 1878 weltweit mehr als 1.500 Stück davon aus. Damit versorgten sie die wachsenden Armeen menschlicher Rechner in den Rechensälen des Militärs, der Forschung und der Wirtschaft. Der Beruf des Computers war nicht nur

ein Handwerksberuf. Das Rechnen war als arbeitsteilige Tätigkeit ein mechanischer Vorgang geworden, ähnlich der Fließbandarbeit eines Arbeiters in den aufkommenden Fabriken. „One eighteenth-century computer remarked that calculation required nothing more than ‚preserving industry and attention, which are not precisely the qualifications a mathematician is most anxious to be thought to possess‘. It might be best described as ‚blue-collar science‘“ (Grier 2005: 4, 5). Heute sind vor allem die weiblichen Computer der Moore School of Engineering der Universität von Pennsylvania bekannt, die während des Zweiten Weltkriegs Tabellen für Raketenbahnen berechneten. An eben demselben Ort wurde 1946 ENIAC Electronic Numerical Integrator and Computer, einer der ersten elektronischen Computer, gebaut. Nicht nur der steigende Rechenbedarf oder die Absicht, den Menschen die eintönige Arbeit des Rechnens abzunehmen, waren ausschlaggebend für die forcierten Bemühungen, Computer zu bauen. Es waren ökonomische Gründe, die für eine Automatisierung sprachen:

“It seems that the [SSEC Self-Sequencing Electronic Computer von IBM] machine could be rented this fall for several weeks,“ schrieb der Computerpionier John von Neumann 1948. “The price is likely to be \$300-\$400 per hour of actual computing time. Regarding this price the following should be said: The machine multiplies (two 14 decimal digit numbers) in 20 msec. In parallel with this, it consumes 20 msec in sensing and obeying any kind of order. My judgment is that it takes 3 to 4 orders to ‚administer‘ a multiplication. Hence it is reasonable to allow about 70 msec, or with checking 140 msec per multiplication. This amounts to 7 multiplications per second, that is, 25.000 per hour. At \$350 per hour, this is 1.4 cents per multiplication. In a human computing group a (10 decimal digit) multiplication (with a ‚Friden‘ or ‚Merchant‘) takes about 10 sec. [...] Allowing \$50 per computer-week and a factor 2 for general overheads, this gives 12.5 cents per multiplication. Hence, the SSEC is, at these prices, $12.5/1.4 = 9$ times cheaper than a human computer group“ (von Neumann 1948/1963: 665).¹³

Es ist diese Automatisierung des Rechnens, die den Anfang vom Ende des Rechnens per Hand, des Berufs des Computers und einer Fülle alternativer Rechenmethoden und Hilfsmittel markierte.

13 Die Friden wurde in den 1930er Jahren von Carl M. Friden entwickelt und von der Friden Calculating Machine Co., Inc. in den USA vertrieben. Die Marchant war ein Tischrechner der Marchant Calculating Machine Company, der 1911 erstmals vertrieben wurde.

Automatisierung des Rechnens

Die Entwicklungen des 17. Jahrhunderts hatten einen wachsenden Einfluss der Formalisierung und Mechanisierung auf Wissenschaft, Technik und Alltag zur Folge. Algorithmen, Kalküle, mechanische Instrumente, aber auch die Idee der industriellen, arbeitsteiligen Produktion stehen im Zeichen der regelbasierten Ordnung von Aktivitäten.¹⁴ Ohne Formalisierung ist Mechanisierung nicht denkbar (vgl. Krämer 1988, 1991). Bereits 1637 stellte René Descartes in seiner Schrift *Von der Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Forschung* dafür die Regeln auf: „Niemals eine Sache als wahr anzuerkennen, von der ich nicht evidentermaßen erkenne, dass sie wahr ist [...] Jedes Problem, das ich untersuchen würde, in so viele Teile zu teilen, wie es angeht und wie es nötig ist, um es leichter zu lösen [...] Mit den einfachsten und am leichtesten zu durchschauenden Dingen zu beginnen, um so nach und nach, gleichsam über Stufen, bis zur Erkenntnis der zusammengesetzten aufzusteigen, ja selbst in Dinge Ordnung zu bringen, die natürlicherweise nicht aufeinander folgen [...] Überall so vollständige Aufzählungen und so allgemeine Übersichten auszustellen, daß ich versichert wäre, nichts zu vergessen“ (Descartes 1637/1960: 15, 16). Damit skizzierte Descartes das Vorgehen der neuzeitlichen Wissenschaft, indem sie in analytischer Weise alle Probleme in Teilprobleme und alle Lösungen in Lösungsschritte zerlegt. Das derart gewonnene und dargestellte Wissen, so die Hoffnung Descartes, würde für jedermann nachvollziehbar, wiederholbar und überprüfbar sein. Mit seiner Methode, die er der geometrischen Beweisführung entlehnte, sollten alle geometrischen und algebraischen Probleme lösbar sein, solange man diesen Regeln folgte. Jedes Kind könne, falls es die Regeln befolge, solche Probleme lösen: Warum nicht auch eine Maschine?

Descartes Methode basierte zwar auf einem mechanisierbarem Konzept des Problemlösens und damit auch des Rechnens, tatsächlich aber war die praktikable Delegation einer breiten Fülle von Problemlösungen an Maschinen mit dem damaligen Verständnis von algorithmischem, also regelbasiertem Problemlösen nicht möglich. Descartes Vorschlag erinnert heute eher an vage Kochrezepte als an maschinentaugliche Algorithmen. Tatsächlich dauerte es weitere zweihundert Jahre bis die Mathematikerin Ada Lovelace eine erste Maschinenanweisung für die von

14 Beispielsweise wäre Adam Smiths Werk *The Wealth of Nations* von 1776 ohne die Formalisierung und Mechanisierung von Abläufen nicht denkbar. Im 18. und 19. Jahrhundert kommt es zu einer regelrechten Normierungs- und Quantifizierungswut, die bis heute anhält (vgl. Porter 1988, 1996; Poovey 1998; Star, Bowker 2000).

Charles Babagge konzipierte, aber niemals gebaute Analytical Engine formulierte. 1843 schrieb sie: „I want to put in something about Bernoullis Numbers [...] as an example of how an implicit function may be worked out by the engine, without having been worked out by human head and hand“ (Lovelace 1843). Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts blieben Rechenmaschinen jedoch rein mechanische Geräte. Ihre Mechanik war mit den Operationen, die sie ausführen konnten, identisch. Oder in anderen Worten: Die Hardware war zugleich die Software. Beispielsweise basierte der Arithmometer auf einer Staffelwalze, die bereits 1627 von Leibniz erfunden worden war (vgl. Leibniz 1703). Die Verteilung der Zähne auf der Staffelwalze entsprach den mathematischen Operationen, welche die Maschine ausführen konnte. Doch über die vier Grundrechenarten kamen diese mechanischen Rechenmaschinen nie hinaus.¹⁵ Daher bedurfte es anderer Hilfsmittel, um komplexe Operationen wie das Wurzelziehen oder das Lösen anspruchsvoller Gleichungen in einer einzigen Maschine zu automatisieren.

Diese Revolution des maschinellen Rechnens begann mit einem Gedankenexperiment des Mathematikers Alan Turing zur Frage, was ein Algorithmus denn genau sei. Turing gab keine Definition eines Algorithmus, sondern er konzipierte 1936 eine ideelle Maschine, die den Prozess des Schreibens selbst mechanisierte (vgl. Turing 1936; Church 1936). „Turing greift dazu auf seine Schulzeit zurück und beschreibt den Vorgang des Rechnens als Notieren von Zahlen nach festen Regeln in den Rechenkästchen kariierter Schulhefte. Dies ist ein völlig mechanischer Prozeß, und Turing beschreibt ihn deshalb angemessen im Modell einer programmierten Maschine, der Turing-Maschine“ (Coy 1994: 71). Die Turing-Maschine sollte Zeichen schreiben, lesen und löschen können, indem sie sich nach den Anweisungen eines Programms entlang eines Papierbandes von einem Feld zum nächsten bewegte. Jede Anweisung musste derart formuliert sein, dass sie schrittweise ausgeführt werden konnte. Dabei war das Ziel, eine Ausgangskonfiguration von Zeichen in endlich vielen Feldern in eine neue Konfiguration zu überführen. „If at each stage the motion of a machine [...] is completely determined by the configuration, we shall call the machine an ‚automatic machine‘ (a-machine)“ (Turing 1936/1964: 118). Turing behauptete, dass jeder Algo-

15 Eine Ausnahme bilden mechanische Rechenmaschinen, die eine bestimmte Gleichung lösen konnten, beispielsweise zur Berechnung der Gezeiten. Als einzige frei programmierbare, mechanische Rechenmaschine kann Vannevar Bushs Differential Analyzer gelten, den er zwischen 1928 und 1932 am Massachusetts Institute of Technology entwickelte (vgl. Bush 1936).

rithmus, der diesen Regeln folgt, berechenbar und daher von einer frei programmierbaren Maschine ausführbar sei. Mit dem Konzept der Turing-Maschine spezifizierte er Descartes Regeln von 1637, wie ein Problem zu analysieren und zu lösen sei, und er verschob die Problematik, eine frei programmierbare Rechenmaschine zu bauen, von der Hardware auf die Software. Die Hardware musste lediglich in der Lage sein, in normierter Weise mit Symbolen umzugehen und diese gemäß einem Programm regelbasiert zu manipulieren. Doch Turings Idee einer a-Machine und Babbages Analytical Engine existierten lediglich auf dem Papier. Solange kein geeignetes Medium für die Ausführung unterschiedlichster Symboloperationen gefunden war, ließen sich diese Papiermaschinen nicht in die Realität umsetzen. Erst als die Mechanik durch Elektrik und später Elektronik ersetzt wurde, gelang es, solche frei programmierbaren Maschinen zu bauen. Führt die erste Medienwende von der Räumlichkeit der Zähl- und Rechenobjekte auf die Ebene des Papiers, so transformierte die zweite Medienwende die Statik des Papiers in das fluide Medium des Stroms. Der Computer als symbolverarbeitende Maschine simuliert dabei den Prozess des Schreibens selbst. Was geschrieben wird, hängt vom Programm ab. Doch erst in den 1940er Jahren begann die Geschichte der tatsächlich gebauten Computer mit Rechnern, die so groß waren, dass sie Maschinenhallen füllten: 1938 stellte Konrad Zuse seine Z1 und 1941 seine Z3 fertig, 1942 bauten John Atanasoff und Clifford Berry den ABC Computer sowie Howard H. Aiken Mark I, gefolgt von Tommy Flowers Colossus 1944, John Mauchlys und Presper Eckerts ENIAC 1946 und dem SSEC Rechner von IBM 1948 (vgl. Campbell-Kelly/Aspray 1996; Ceruzzi 1998; Ifrah 2001). Diese ersten Großrechner kamen ohne Software, Bildschirme oder Drucker aus. Sie konnten jedoch mehrere Operationen pro Sekunde ausführen, weshalb sie bald als Elektronengehirne bezeichnet wurden. Die Programmierung dieser Großrechner war schweißtreibende Arbeit. Für ENIAC beispielsweise, der aus 18.000 Vakuumröhren bestand, mussten Tausende von Steckverbindungen verkabelt werden. „Setting up the ENIAC meant plugging and unplugging a maze of cables and setting arrays of switches. In effect, the machine had to be rebuilt for each new problem it was to solve“ (Ceruzzi 1998: 21). Die Programmierer befanden sich buchstäblich in Mitten der Computer, die nicht annähernd die Leistungsfähigkeit eines heutigen Mikrochips hatten. Auch Computerbugs waren noch echte Käfer, die Kurzschlüsse verursachten. Grace Hopper, die erste Programmiererin des Harvard Computers Mark I, fand im September 1945 eine Motte in einer der Vakuumröhren und schrieb in das Entwicklungslogbuch: „First actual case of bug being found“ (Hopper 1945). Doch im Laufe der Jahre wurden die Rechner

nicht nur schneller und einfacher in ihrer Bedienung, ihre Verbreitung nahm rapide zu. Bereits in den frühen 1960er Jahren waren weltweit Computer im Wert von rund 100 Millionen Dollar installiert. Automatisierung, Planung und Prognose industrieller Prozesse beanspruchten dabei die meiste Rechenzeit. 1969 eroberte die NASA mit einem IBM System/360 Großrechner, der 10.000 Operationen pro Sekunde ausführte, den Mond, und 2001 entschlüsselten Supercomputer das menschliche Genom. Die Supercomputer der TOP-500 Liste der weltweit schnellsten Rechner okkupieren nach wie vor hallengroße Gebäude und haben eigene Namen wie BlueGene/L, Earth Simulator, Red Storm, Frontier, Mare Nostrum oder Thunderbird (vgl. TOP-500 2008). Diese Number Cruncher führen Billionen von Operationen pro Sekunde aus und stoßen mittlerweile an ihre physikalischen Grenzen. Ein Vergleich zwischen frühen und aktuellen Computern zeigt: Wofür der Earth Simulator, von Juni 2002 bis Juni 2004 schnellster Rechner der Welt, sechs Tage Berechnungszeit benötigt, hätte einen Cray-1 Computer, schnellster Rechner des Jahres 1978, mehr als sieben Millionen Jahre beschäftigt. Menschliche Rechner müssten dafür bis in alle Ewigkeit rechnen. Diese Rechenkapazitäten werden heute nicht nur für die Automatisierung, die Planung oder den Betrieb von Benutzersoftware benötigt, sie werden hauptsächlich für die Ausführung numerischer Simulationen gebraucht. Neben allen Veränderungen, die der Computer für Wissenschaft und Technik in der Vergangenheit mit sich brachte, ist es die Entwicklung und Nutzung numerischer Simulationen, die Wissenschaft und Technik aktuell grundlegend revolutionieren. Numerische Simulationen erlauben es, auf Basis von Berechnungen Computerexperimente durchzuführen, in die Zukunft zu prognostizieren und die Natur zu optimieren – vorausgesetzt die Natur verhält sich wie die berechenbare Mechanik eines exakten Uhrwerks.

Numerische Simulation unbekannter Lösungen

Als Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz Ende des 17. Jahrhunderts die Differentialrechnung erfanden und damit das Rechnen mit Unendlichkeiten operationalisierten, hatten sie sich sicherlich keine Vorstellung davon, welchen gewaltigen Einfluss ihre Entwicklung auf Wissenschaft, Technik und Alltag haben würde.¹⁶ War die Beherrschung des Nichts die herausragende intellektuelle Leistung des frühen Mittelalters, so stellte die Beherrschung des Unendlichen die maßgebliche Leistung

¹⁶ Eine ausführliche Darstellung der Entwicklung des Differentialkalküls wird im nächsten Kapitel im Abschnitt Mathematisierung und Momentum gegeben.

am Übergang zur Neuzeit dar. Die Operationalisierung beider Konzepte mit Hilfe von Symbolen und Rechenregeln erlaubt es Wissenschaftlern und Ingenieuren, die Entwicklung von Prozessen in Raum und Zeit mathematisch zu beschreiben. Das Differentialkalkül ist dabei die maßgebliche Methode, um die Bewegung und Dynamik eines Geschehens darzustellen. Es nimmt Bezug auf die neuzeitliche Idee einer Welt, die wie die Mechanik eines exakten Uhrwerks funktioniert. 1814 formulierte Pierre-Simon de Laplace optimistisch: „Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren Zustandes und andererseits als die Ursache dessen, der folgen wird, betrachten. Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle Kräfte, von denen die Natur belebt ist, sowie die gegenseitige Lage der Wesen, die sie zusammen setzen, kennen würde, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Grössen einer Analyse zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der grössten Weltkörper wie die des leichtesten Atoms ausdrücken: nichts würde für sie ungewiss sein und Zukunft wie Vergangenheit ihr offen vor Augen liegen. Der menschliche Geist bietet in der Vollendung, die er der Astronomie zu geben gewusst hat, ein schwaches Bild dieser Intelligenz“ (de Laplace 1814: Einleitung).

Das deterministische Wissenschaftsverständnis, wie es Laplace treffend beschrieb, resultierte aus der Entdeckung der Naturgesetze durch Galileo, Kepler und Newton: 1590 hatte Galileo das Gesetz der fallenden Körper formuliert, 1609 beschrieb Kepler das Gesetz der Planetenbewegung und 1687 verfasste Newton die drei fundamentalen Gesetze der Bewegung.¹⁷ Basierend auf diesen Gesetzen wurde für die Wissenschaft das Verhalten der Natur in Form von Bewegungsgleichungen beschreibbar, und damit berechenbar und vorhersagbar. Im Kontext dieser mechanistischen Auffassung wurde Bewegung als Änderungsrate von Quantitäten im Verhältnis zu anderen Quantitäten artikuliert (dx/dy). Diese Verhältnisse lassen sich mit Differentialen auf Papier schreiben oder als Kurven grafisch darstellen. Zahlreiche mathematische Modelle wissenschaftlicher Sachverhalte basieren seither auf Differentialgleichungen. Um diese Modelle zu berechnen, müssen aus den Gleichungen Lösungsfunktionen analytisch abgeleitet werden, die dann das Verhalten des realweltlichen Systems für jeden Moment beschreiben. Berechnen ist hier algebraisch, als Umformung von Gleichungen in allgemein gültige exakte, d.h. für alle Raum- und Zeitpunkte geltende Lösungsfunk-

17 Galileo formulierte 1590 in *De motu antiquiora* die Fallgesetze, Kepler beschrieb 1609 in *Astronomia Nova* die Bewegung der Planeten auf elliptischen Bahnen und Newton postulierte 1687 in seinem Werk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* die Bewegungsgesetze.

tionen, zu verstehen. Indem Zahlwerte in die Lösungsfunktion eingesetzt werden, lassen sich diese dann für konkrete Problemstellungen numerisch berechnen und in die Zukunft extrapolieren. Auf diese Weise werden die Umlaufbahnen von Planeten, die ballistischen Kurven von Kanonenkugeln oder der Landeanflug einer Marssonde berechnen- und vorhersagbar.

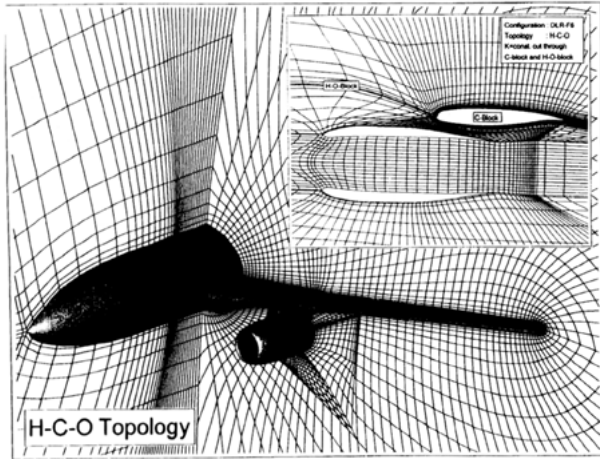


Abbildung 3: Berechnungsgitter für die numerische Simulation der Strömung um ein Flugzeug, (SCAI Report 1998: 16)

Eines der wichtigsten Differentialgleichungssysteme der Wissenschaft sind die Navier-Stokes-Gleichungen, die in Form nicht-linearer Differentialgleichungen zweiter Ordnung das Strömungsverhalten von Flüssigkeiten und Gasen beschreiben. Diese Gleichungen der Strömungsmechanik finden in der Meteorologie, der Physik und der Technik eine breite Anwendung und gehen auf die Arbeiten der Physiker Claude-Louis Navier und George Gabriel Stokes Mitte des 19. Jahrhunderts zurück (vgl. Navier 1822, Stokes 1845). Das Problem der Strömungsdynamik ist jedoch, dass diese Gleichungen nur für stark idealisierte Randbedingungen analytisch lösbar sind, beispielsweise für langsam fließende Flüssigkeiten in einem geraden Rohr ohne Reibung und Hindernisse. Soll jedoch die Strömung für realistischere Randbedingungen wie Hindernisse in der Strömung, raue Oberflächen oder geknickte Rohre berechnet werden, dann werden die Gleichungen zu komplex, um sie analytisch lösen zu können. Dies bedeutet, dass sich keine Lösungsfunktion aus den Gleichungen ableiten lässt, dass man die exakte Lösung also nicht kennt. Diese komplexen, aber analytisch unlösbaren Gleichungen sind jedoch für viele Bereiche der Wissenschaft und Technik unver-

zichtbar, soll das Wetter von Morgen, die Klimaentwicklung der nächsten Jahrzehnte oder die Strömung um einen Flugzeugflügel berechnet werden.

Die mathematische Alternative zur analytischen Lösung ist nun die numerische Simulation der Gleichungen. Dabei wird keine exakte Lösungsfunktion algebraisch abgeleitet, sondern die Variablen der Gleichung werden numerisch berechnet. Möglich wird dies, indem die Gleichungen mit numerischen Werten – Zahlenwerte, die meist aus Messungen stammen – initialisiert und von Zeitschritt zu Zeitschritt für einzelne Berechnungspunkte, wie in Abbildung 3 dargestellt, berechnet werden. Dabei liegt der numerischen Simulation die Idee zugrunde, dass je höher die Auflösung der raum-zeitlichen Berechnungen ist – also je dichter das Netz an Berechnungspunkten und die Anzahl der Zeitschritte wird – desto mehr nähert sich die approximierte Lösung der exakten, aber unbekannten Lösung an. Die Simulation simuliert sozusagen numerisch die unbekannte algebraische Lösung. Simulationen sind daher immer nur Näherungsverfahren und sie gelten nur für den berechneten Raum-Zeit-Ausschnitt auf Basis der gewählten Anfangswerte, mit welchen sie initialisiert wurden. Solche numerischen Simulationen können zwar für sehr grobe Berechnungsgitter und sehr einfache Gleichungen prinzipiell per Hand berechnet werden, so wie dies Lewis Fry Richardson in den 1920er Jahren versuchte. Angesichts des enormen Rechenaufwandes für etwas komplexere Gleichungen und Randbedingungen sowie höhere Auflösungen bedarf es jedoch leistungsfähiger automatischer Rechenmaschinen. Denn je feiner die Auflösung, aber auch je mehr Variablen und realitätsnahe Annahmen berücksichtigt werden, desto höher ist der Rechenaufwand. Beispielsweise werden heutige Klimamodelle global gerechnet, mit einer Auflösung von hundert Kilometern. Die Simulationen durchlaufen für diese Berechnungen allein für einen Zeitschritt bereits Millionen von Rechenoperationen. Selbst heutige Supercomputer benötigen einen ganzen Tag, um die Klimaentwicklung für drei Jahre zu simulieren, denn pro simuliertem Jahr müssen einige Quadrillionen Berechnungen durchgeführt werden. Daher verwundert es nicht, dass es die neue Rechentechnik der Simulation ist, die von Beginn an die Computerentwicklung angetrieben hat und dies bis heute tut. Anfangs aus militärischen Notwendigkeiten des zweiten Weltkrieges, aber bald danach aufgrund wissenschaftlicher, technischer und industrieller Erfordernisse. Was mit der Revolution des Rechnens und den mechanischen Recheninstrumenten im Mittelalter begann, hat sich mittlerweile zu komplexen Berechnungen auf Basis umfangreicher Simulationsmodelle und Number Crunchern enormen Ausmaßes entwickelt. Ziel dieser Berechnungen ist nichts weniger als die Natur in Form numerischer Computerexperi-

mente zu optimieren und die Zukunft vorherzusagen. Doch diese Computorexperimente bergen ein Problem in sich.

Blickt man auf die historische Entwicklung des Rechnens zurück, so enthüllt sich der mechanistische und deterministische Blick der Wissenschaften auf die Welt. Dieser Blick wurde spätestens mit Newtons Werk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* von 1687 in seinem vollen Ausmaß deutlich. Mit dieser Schrift verankerte er die Idee, nach der alles, was berechenbar ist, auch wissenschaftlich wahr ist. Motiviert wurde er dabei von Keplers Berechnung und erfolgreicher Vorhersage der Bahn zweier Planeten. Doch was als Newtons Traum von einem deterministischen und komplett berechenbaren Universums begann, wandelte sich zweihundert Jahre später in einen Alptraum. Der Mathematiker Henri Poincaré konnte 1889 in seiner Antwort auf die Preisfrage von Schwedens König Oskar II nach der Stabilität des Sonnensystems nachweisen, dass sich bereits ein Drei-Körper-System instabil und chaotisch verhalten kann und dass das Sonnensystem als Mehr-Körper-System irgendwann kollabieren würde (vgl. Poincaré 1891).

„Würden wir die Gesetze der Natur und den Zustand des Universums für einen gewissen Zeitpunkt genau kennen, so könnten wir den Zustand dieses Universums für irgendeinen späteren Zeitpunkt genau voraussagen. Aber selbst wenn die Naturgesetze für uns kein Geheimnis mehr enthielten, können wir doch den Anfangszustand immer nur näherungsweise kennen. Wenn wir dadurch in den Stand gesetzt werden, den späteren Zeitpunkt mit dem selben Näherungsgrade voraussagen, so ist das alles, was man verlangen kann; wir sagen dann: die Erscheinung wurde vorausgesagt, sie wird durch die Gesetze bestimmt. Aber es ist nicht immer so; es kann der Fall eintreten, dass kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersteren kann einen außerordentlich großen Irrtum für die letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich und wir haben eine ‚zufällige Erscheinung‘“ (Poincaré 1908/1973: 56-57).

Die Vorstellung eines instabilen Sonnensystems schockierte Poincarés Zeitgenossen zutiefst. Der strenge Determinismus Newtons, ein Universum, in dem sich alle Objekte in vorhersagbaren Bahnen bewegen, löste sich vor ihren Augen in Chaos auf und damit der Traum neuzeitlicher Wissenschaft, die Welt exakt berechnen und prognostizieren zu können. Wenn selbst kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen konnten, so ließ das ungenaue Wissen über die Naturgesetze und Anfangszustände es nicht zu auf den Endzustand zu schließen. Dies stand konträr zur deter-

ministischen Doktrin linearer Systeme, in welcher kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen ebenso kleine und vor allem genau berechenbare Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen. Das idealisierte Zwei-Körper-System mit perfekten Kugelplaneten, wie es Kepler für seine Planetenbahn berechnet hatte, verhielt sich linear, solange es keinen störenden Einfluss gab. Ein Drei-Körper-System verhält sich durch den Einfluss des dritten Körpers bereits nicht mehr linear und damit, unter bestimmten Umständen, chaotisch. Exakte und damit sichere Prognosen sind für Drei-Körper-Systeme nicht möglich, da bereits jede Messung Ungenauigkeiten in sich birgt. Die Simulation des Wetters, des Klimas oder von Molekülen beschreibt Systeme, die um ein Vielfaches komplexer sind. Die moderne Wissenschaft muss sich daher von der Idee einer exakt berechenbaren und vorhersagbaren Welt verabschieden, unabhängig davon wie leistungsfähig die Computer sind oder in Zukunft noch werden. Daraus folgt, dass Prognosen für komplexe Systeme prinzipiell von Unsicherheiten gekennzeichnet sind. Selbst wenn sich die Welt gemäß des strengen Determinismus eines Newton oder Laplace verhalten würde, die Wissenschaft könnte sie mit ihren mathematischen Modellen und schnellen Computern niemals exakt berechnen.

2 VOM EXPERIMENT ZUM COMPUTEREXPERIMENT

Mathematik und Berechnung sind das eine Standbein moderner Wissenschaft, Empirie in Form von Beobachtung, Experiment und Messung das andere. Um beide miteinander zu verbinden, bedarf es nicht nur geeigneter Rechentechniken wie sie die frühe Neuzeit entwickelt hat, sondern auch einer entsprechend angepassten Forschungslogik und eines Verständnisses dessen, was als real angesehen wird. Wie dem Rechnen, geht auch der empirischen Forschung eine Entwicklungsgeschichte voraus, welche die Voraussetzungen dafür schuf, dass sich Wissenschaft aktiv mit den Phänomenen und Prozessen der Natur auseinandersetzt und diese reproduzierbar macht. Die Geschichte des empirischen Wissens reicht weit ins Mittelalter zurück und dokumentiert die Transformation dessen, was unter wissenschaftlicher Erfahrung und Forschung, aber auch unter Realität und dem Verhältnis des Menschen zur Realität verstanden wurde. Diese Transformation kumuliert in der neuzeitlichen Konzeption des mechanistischen Weltbildes und dessen Verständnis von Empirie als instrumentenvermittelter Beobachtung, Messung und Experiment.

Zu Beginn dieser Entwicklung im frühen Mittelalter sind Experimente, die in die natürliche Ordnung eingreifen, noch undenkbar. Zwar hatte Aristoteles als die maßgebliche philosophische Autorität des Mittelalters 350 v. Chr. bereits empirische Studien betrieben, doch basierten diese vor allem auf Beobachtungen. Zwei Aspekte prägen entscheidend die mittelalterliche Wissenschaftsauffassung und dokumentieren den Unterschied zum Denkstil der Neuzeit und Moderne. Das eine ist die theologische Interpretation der Welt, denn in der Natur zeige sich der Schöpfer-

wille Gottes und diesen galt es in ehrfürchtigem Staunen zu betrachten.¹ „Das Staunen hatte seinen Ursprung in der philosophischen Kontemplation. [...] Neugier dagegen war das moralisch zweifelhafte Begehren, Sachen herauszufinden, die einen nichts angingen, seien es die Geheimnisse der Natur oder die der Nachbarn“ (Daston 2001: 81). Neugierde oder gar Eingriffe in die natürliche Ordnung durch Experimente verboten sich daher von selbst und so waren theologischen Spekulationen über Naturphänomene Tür und Tor geöffnet. Aus heutiger Sicht wunderbar anmutende Theorien über die Wasser des Himmels oder die Transmutation unedler Metalle in Gold waren anerkannte und diskutierte Themen. Vor diesem spekulativen Hintergrund ist Albertus Magnus Bemerkung anlässlich der Gründung des ersten Studiums Generale im deutschsprachigen Raum 1248 in Köln zu verstehen: „Wenn wir Naturwissenschaften betreiben, dann müssen wir danach forschen, was auf natürliche Weise in der natürlichen Wirklichkeit geschehen kann, nach den inneren Ursachen der Natur, und nicht nach der Art und Weise erkunden zu suchen, nach der Gott, der Schöpfer, gemäß seinem freien Willen das von ihm geschaffene Wunder vollbringt, um seine Macht zu demonstrieren“ (Albert 1248, übersetzt in: Sturlese, 1993: 344).

Der zweite Aspekt scholastischer Wissenschaftsauffassung zog sich als Disput durch das gesamte Mittelalter und verhandelte die Frage, was als real anzusehen sei: die Allgemeinbegriffe und Prinzipien oder das Einzelne, sinnlich Wahrnehmbare. Setzten sich im so genannten Universalienstreit zunächst die idealistischen Realisten mit ihrer Auffassung durch, die Universalien seien als reale Wesenheiten zu denken, so entwickelten sich ab dem 10. Jahrhundert konträre Ansichten. Die Nominalisten, allen voran Anselm von Canterbury, waren der Auffassung, dass nur Dinge, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können, real seien. Begriffe hingegen seien nur Bezeichnungen. Diese *Via moderna* kritisierte die reale Existenz allgemeiner Begriffe, auch die eines Gottes oder

1 „War das Interesse an methodisch strenger Erforschung der Natur schon in der Spätantike auf die Herausarbeitung des Exempelhaften und Wunderbaren zusammengeschrumpft, so verstärkte sich diese Tendenz bei den Kirchenvätern noch. Sie betrachteten die Natur vornehmlich als Symbol der Weisheit Gottes und als einen Weg, der über die Natur hinausführte. Augustinus warnte davor, ihr zu viel Eigeninteresse zuzuwenden. Was wir heute Naturwissenschaft nennen, war in seinen Augen verwerfliche Neugier (*curiositas*), weil sie nicht darauf abzielte, über die sichtbare Natur hinauszugehen“ (Flasch 1995: 117). Das Mittelalter berief sich bezüglich der Naturerscheinungen vor allem auf Plinius Naturgeschichte aus dem ersten Jahrhunderts n. Chr. Plinius behandelte darin die Kosmologie, die Erdteile, den Menschen, Tiere, Pflanzen und Mineralien.

der Seele.² Die Frage nach der Natur der Allgemeinbegriffe war jedoch für die Entwicklung eines wissenschaftlichen Denkens entscheidend, denn sie klärte die Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnis und den Gegenstand von Forschung. Solange das Allgemeine die Grundlage bildete, konnte man den Einzeldingen – sei es durch Beobachtung oder Experiment – nichts Interessantes entlocken. Wenn aber die Einzeldinge das Reale waren, dann ließen sich auf dieser Grundlage durch Beobachtung und Experiment wichtige Erkenntnisse gewinnen.

Der Universalienstreit war eng verknüpft mit den maßgeblichen Quellen des mittelalterlichen Denkens, insbesondere mit den Auslegungen der Schriften des Aristoteles und, durch diesen vermittelt, Platons. Da bis weit ins Mittelalter nur die logischen Schriften Aristoteles bekannt waren, konnte sich das Ideal, Erkenntnis aus dem Allgemeinen zu deduzieren, behaupten: Ausgehend von obersten Grundsätzen sollten – wie es die Geometrie mit ihrer Axiomatik seit Euklid praktizierte – mittels Beweise Erkenntnisse deduziert werden.³ Zwar konnten sinnliche Erfahrungen herangezogen werden, um induktiv zu Axiomen zu gelangen, doch mussten diese, allgemein einsichtige Sachverhalte darstellen. Wissenschaft wurde nicht als Aufzählung einzelner Fakten verstanden, geschweige denn als experimentelle Einzeluntersuchungen. Erst im 12. Jahrhundert drangen über die arabischen Kommentatoren die realwissenschaftlichen Texte des Aristoteles ins mittelalterliche Bewusstsein und damit neue Konzepte wissenschaftlicher Praxis. Aristoteles hatte über Meteorologie, Biologie, Botanik, Medizin, Astronomie und vieles mehr geschrieben und legte dabei ein strukturiertes Vorgehen basierend auf wissenschaftlichen Beobachtungen an den Tag. Als empirischer For-

-
- 2 Mit ihrem gemäßigten Realismus bemühten sich Albertus Magnus und Thomas von Aquin um einen gangbaren Mittelweg, indem sie dem Allgemeinen keine eigene Realität zusprachen, es aber in den Einzeldingen realisiert sahen. Ohne diese Realisierung in den Einzeldingen sei das Allgemeine nur ein Gedanke.
 - 3 Die aristotelische Axiomatisierung und die Geometrie Euklids, die als Paradebeispiel der geometrischen Beweiskunst galt, stellten die Grundlage des frühmittelalterlichen Wissenschaftsideals dar. Eingeführt wurde dieses Ideal durch die Kommentare des Proclus Diadochos zu Euklids Werk *Elemente* im 5. Jahrhundert, Boethius Übersetzung der logischen Schriften des Aristoteles im 6. Jahrhundert sowie durch die Übersetzung des fälschlicherweise Aristoteles zugeschriebenen *Liber Causis* im 12. Jahrhundert ins Lateinische (vgl. Schüling 1969; Flasch 1995). „Wissenschaftlich denken, das hieß: die Logik des Aristoteles auf ein gegebenes Feld anwenden“ (Flasch 1995: 48). Im Unterschied zu Aristoteles war Platon nur durch Aristoteles Platon-Kritik bekannt. Von den Platonischen Dialogen waren vor dem 12. Jahrhundert nur *Menon*, *Phaidon*, *Timaios* und *Parmenides* ins Lateinische übersetzt.

scher gründete er seine naturwissenschaftlichen Überlegungen auf Faktensammlungen, beispielsweise von Tieren und Pflanzen. Er dokumentierte deren charakteristische Eigenschaften und klassifizierte sie nach gemeinsamen Merkmalen bzw. grenzte sie durch Unterschiede voneinander ab.⁴ Auf Basis solcher Faktensammlungen und den daraus gewonnenen Induktionen, gab er dann Erklärungen für mögliche Ursachen der Erscheinungen an. Dabei wurden die Induktionen als Prämissen für deduktive Schlüsse in Form von Syllogismen gewonnen.⁵ Auch wenn diese Form der Schlussfolgerung dem antiken Wissenschaftsideal verpflichtet war und neuzeitlichen Ansprüchen nicht genügte, so vermittelten die realwissenschaftlichen Texte des Aristoteles dem späten Mittelalter eine Vorstellung davon, was es hieß, Wissenschaft basierend auf genauen Beobachtungen zu betreiben und empirische Ordnungen vorzunehmen.

Allerdings hatte die aristotelische Naturforschung ihre Grenzen. Obwohl die Praktik recht modern wirkte, die epistemische Verankerung der aristotelischen Naturstudien war es nicht. Aristoteles führte zwar das induktiv-deduktive Schema wissenschaftlicher Forschung in seinen realwissenschaftlichen Schriften ein. Studien der Natur mussten aber allein auf allgemein einsichtige Beobachtungen basieren. Oder, wie Peter Dear es in seiner Studie *Discipline and Experience* beschrieb: „Singular, unusual events were of course noticed and reported, but they were not, by definition, revealing of how nature behaves ‚always or for the most part‘, as Aristotle said; instead, they might be classified as ‚monsters‘ or even ‚miracles‘“ (Dear 1995: 14). Beobachtungen und Experimente mit Hilfe von Instrumenten, die Einblicke in die Natur gaben, die nicht von jedermann nachvollzogen werden konnten, galten im aristotelischen Sinne als nicht wissenschaftlich. Noch im 17. Jahrhundert musste sich Galileo, als er durch sein Teleskop die raue Oberfläche des Mondes und die Jupitermonde entdeckte, gegen die Spekulationen seiner

4 Für Aristoteles wurden Verallgemeinerungen induktiv aus allgemein einsichtigen Sinneserfahrungen gewonnen. Induktionen sind dabei einfache Aufzählung der Art: x_1 hat Eigenschaft P, x_2 hat Eigenschaft P, etc. aus welchen folgt, dass alle x die Eigenschaft P besitzen. Induktionen dienten als Prämissen für Deduktionen. Dieses induktiv-deduktive Schema ist typisch für die aristotelische Realwissenschaft. Es wurde von den mittelalterlichen Philosophen und Naturforschern als Methode der Auflösung und Zusammensetzung der Phänomene betitelt, um die natürlichen Phänomene zu rekonstruieren (vgl. Losee 1977: 17ff).

5 Eine dieser typischen Schlussfolgerungen Aristoteles war, dass alle Lebewesen, die eine Lunge aufwiesen einen Hals haben müssen. Den Grund dafür sah Aristoteles in der Funktionsweise der Lunge. Er hatte in seiner Faktensammlung festgestellt, dass Lebewesen mit Lunge eine Luftröhre aufweisen.

Kollegen zur Wehr setzen. Entsprechend der scholastischen Kosmologie galten die Planeten als perfekte Kugeln und die Erde als das Zentrum des Universums. Raue Oberflächen und Trabanten, die sich um Jupiter bewegen, passten nicht in das Weltbild. In einem Brief an Johannes Kepler amüsierte sich Galileo über einen Kollegen, „professor of philosophy at Pisa labouring before the Grand Duke with logical arguments, as if with magical incantations, to charm the new planets out of the sky“ (Galileo, übersetzt in: Roberts 1937: 55).

Doch bereits frühe Experimentatoren wie Roger Bacon, die davon überzeugt waren, dass „wir nur durch die eigene Forschung und durch das Experiment zur Wahrheit gelangen können“ (Bacon 1268, übersetzt in: Vogel, 1904: 17) begannen, diese allgemeine Einsichtigkeit in Frage zu stellen. Sie forderten eine *Scientia experimentalis*, deren Forschungslogik alle unnötigen und komplizierenden Erklärungen und vor allem unbelegten Spekulationen vermeidet. Die den Ursprung von Erkenntnis hinterfragt und diese nur durch direkte Gegenstandserfassung erzielt, indem sie die Verknüpfung der Dinge oder Eigenschaften auf ihre Kausalität hin untersucht. Diese Forderungen verfestigten das Verständnis, dass alles was real sei nicht nur sinnlich wahrnehmbar, sondern auch individuell sei und damit Gegenstand von Erkenntnis. Roger Bacons Auffassung markierte die Wende im mittelalterlichen Naturverständnis und bereitete den Weg für die neuzeitliche Wissenschaft, die sich am deutlichsten zweihundert Jahre später im Wissenschaftsprogramm Francis Bacons artikulierte.⁶ Aus der Passivität des Staunens wird nun die Aktivität der forschenden Neugierde, die als intellektuelle Begierde maßgeblich das wissenschaftliche wie technische Handeln bis heute prägt. Denn, so die Meinung Roger Bacons, man könne das induktive Verfahren nur dann erfolgreich anwenden, wenn man ein genaues und umfassendes Tatsachenwissen besäße, und dazu sei aktives und systematisches Experimentieren notwendig. Das Ideal des Erkenntnisfortschritts gründet ebenso in diesem kognitiven Wechsel wie die Idee der Beherrschbarkeit der Natur.

6 Diese Entwicklung zeigte sich auch an den veränderten Studienbedingungen. Galten seit der Antike neben der Theologie das Quadrivium (Arithmetik, Geometrie, Musik und Astronomie) und Trivium (Grammatik, Rhetorik und Dialektik) als klassische Ausbildungsfächer, so kristallisierte sich im 13. Jahrhundert eine neue Einteilung des Studiums in theoretische Philosophie (Naturphilosophie, Mathematik und Metaphysik), praktische Philosophie (Ethik, Ökonomie und Politik) sowie Logik heraus (vgl. Flasch 1995: 306ff).

Scientia experimentalis

In seiner Fabel *Neu-Atlantis* beschrieb Francis Bacon 1642 eine Institution, die den Zweck habe „die Ursachen des Naturgeschehens zu ergründen, die geheimen Bewegungen in den Dingen und die inneren Kräfte der Natur zu erforschen und die Grenzen der menschlichen Macht so weit auszudehnen, um alle möglichen Dinge zu bewirken“ (Bacon 1642/1982: 43). Dazu seien Forschungen in systematischer Form nötig, um „den kausalen Zusammenhang der Dinge möglichst klar darzulegen, der Natur ihre tiefsten Geheimnisse zu entlocken und eine leichtverständliche, eindeutige Auskunft über die unbekannten Bestandteile und Kräfte in den verschiedenen Körpern zu erhalten“ (Bacon, 1642/1982: 55). Damit skizzierte Bacon das Programm der neuzeitlichen Wissenschaft, die instrumentelle Beobachtung und Experiment zu ihren Erkenntnismedien machte. War der mittelalterliche Mensch Teil der Schöpfung, die er bestaunte, so begann er jetzt als Homo faber die Natur gezielt zu ergründen, sie zunehmend durch Technik zu beherrschen und ihre Ressourcen auszubeuten. Wissen sollte von nun an nützlich sein und der Verbesserung der Lebensumstände dienen, statt kontemplativ oder moralistisch zu sein. Diese Entwicklung zeichnete sich bereits im Aufstieg des Merkantilismus und der Handelszentren seit 1300 ab sowie durch die pragmatische Position des Franziskanerordens, vor allem aber durch die Ansichten Roger Bacons in Oxford.⁷ Doch Nützlichkeit stellt andere Anforderungen an die Produktion und Vermittlung von Wissen, als kontemplatives Staunen oder theologische Dogmen. Auch wenn die frühen Experimente nicht den heutigen Standards entsprechen, so revolutionierten sie doch im Laufe des 17. und 18. Jahrhunderts die wissenschaftliche Erkenntnisproduktion. 1666 beschrieb Robert Hooke in seinem Essay *A General Scheme, or Idea of the Present State of Natural Philosophy, and How its Defects may be Remedied by a Methodological Proceeding in the making of Experiments and collecting Observations, whereby to compile a Natural History, as the Solid Basis for the Superstructure of True Philosophy* unterschiedliche Möglichkeiten der Beobachtung und des Experiments je nach wissenschaftlichem Interesse: „By observing how nature proceeds in distributing the same property in

7 Roger Bacon beschäftigte sich im 13. Jahrhundert als einer der ersten Naturforscher mit experimentellen Studien. Er prangerte „das Schwören auf eine unwürdige und hinfällige Autorität, die Macht der Gewohnheit, die Denkweise der gewöhnlichen großen Masse und die Blindheit gegen die eigene Unwissenheit verbunden mit Prahlerie mit der eigenen Weisheit“ (Bacon 1268, übersetzt in: Vogel 1904: 17) als hinderlich für den Erkenntnisfortschritt an.

several bodies [...] by observing the transitions it makes from one property to another [...] by taking notice of all such processes of nature, wherein by the same effective principle it causes quite different products," etc. (Hooke 1666: 992).

Typische Experimente jener Zeit waren Studien zur Lichtbrechung und Optik, zur Bewegung und Geschwindigkeit von Gegenständen, zur Erzeugung eines Vakuums oder zur Funktionsweise des Auges. Experimentieren war zu Beginn der Neuzeit eine Angelegenheit einzelner Naturforscher in privaten Studierzimmern, Universitäten oder Klöstern. Auch waren Experimente oft mit öffentlichen Demonstrationen auf Messen und Märkten verbunden.⁸ Forschungsinstitute gab es noch nicht und erst im Laufe des 17. Jahrhunderts begannen sich Gelehrtenengesellschaften in Form von Akademien zu etablieren.⁹ Mess- und Experimentiergeräte waren ungeeichte Einzelanfertigungen und viele Messgrößen waren noch nicht bekannt. Präzise Beschreibungen und vertrauenswürdige Zeugen waren daher für die Glaubwürdigkeit der experimentellen Resultate von entscheidender Bedeutung. Robert Boyle, einer der erfolgreichsten Experimentatoren jener Zeit, forderte nicht nur von seinen Zeitgenossen, dass sie ihre Experimente präzise beschreiben und dadurch nachvollziehbar und wiederholbar machen sollten.¹⁰ Er selbst wiederholte sein Vakuumexperiment, mit dem er zeigen konnte, dass das Barometer den Druck der Atmosphäre anzeigte und nichts anderes, in Anwesenheit namhafter Forscher wie John Wallis, Seth Ward und Christopher Wren (vgl. Crombie 1994: 954). Diese frühe Experimentalkultur wurde in den bildhaften Darstellungen von Experimenten samt Experimentator und Zuschauer bis weit ins 18. Jahrhundert dokumentiert.

Die Forderung nach der Standardisierung empirischer Forschung spiegelte das zunehmende Verständnis von Wissenschaft als Gemein-

8 „Auch Theater wurden bis weit ins 19. Jahrhundert benutzt, um naturwissenschaftliche Experimentalkunst angemessen in Szene zu setzen, woraus sich schließlich unter Titeln wie Lecture Theatre oder auch Automatical Theatre spezialisierte Einrichtungen entwickelten“ (Schramm 2006: XVI).

9 Die Akademien waren Gelehrtenengesellschaften, die sich zu Wissenschaftsinstitutionen entwickelten. So wurde die Accademia Nazionale dei Lincei 1603 in Rom, die Deutsche Gesellschaft der Naturforscher Leopoldina 1652 in Schweinfurt und die Royal Society 1660 in London gegründet. Weitere Akademiegründungen folgten wie die Académie des Sciences in Paris 1666, die Akademie der Wissenschaften in Berlin 1700 und andere.

10 Galileo Galilei wurde für seinen Stil bewundert, den Weg der Erkenntnis in seinen Schriften offen darzulegen, so dass dieser nachvollziehbar war, während Isaac Newton – nach der Praktik der antiken Geometer – die gefundenen Resultate diskutierte, ohne ihren Entstehungskontext allzu genau zu beschreiben.

schaftsunternehmen wider, in das sich im Laufe des 17. und 18. Jahrhunderts die einzelnen Naturforscher einordneten. Dazu galt es, die Bedingungen der Erkenntnisproduktion neutral, also kontext- und interpretationsunabhängig, zu gestalten und offenzulegen. Jeder Forscher sollte in der Lage sein, die Experimente, Beobachtungen und Messungen seiner Kollegen zu wiederholen und gegebenenfalls die dazu nötigen Instrumente nachzubauen. Um eine solche Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, bedurfte es einheitlicher Beschreibungsformate, Nomenklaturen und Standards. Zur Durchsetzung dieser Standards waren wissenschaftliche Institutionen, wie eben die Akademien, wissenschaftliche Kommunikations- und Publikationsmedien, wie Briefe, Bücher und Journale,¹¹ aber auch ein Verständnis von Wissenschaft als intersubjektives und kollaboratives Unternehmen von Nöten. In diesem Wechselspiel von Standardisierung und Institutionalisierung bildete sich nicht nur das neuzeitliche und moderne Wissenschaftsverständnis heraus, sondern auch die Identifikation der Forscher als Scientific Community. Die Glaubwürdigkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse löste sich im Zuge dieser Entwicklungen von individuellen Zeugen ab und wurde an Instrumente, Methoden und Standards delegiert.¹² Wissenschaft emanzipierte sich von der Sphäre subjektiver Praktiken zu einem intersubjektiven und reglementierten Unternehmen, das zunehmend Anspruch auf objektives Wissen erhob. Dieser Anspruch fand Ende des 19. Jahrhunderts in der Rede von der exakten Wissenschaft seinen Höhepunkt.

Obwohl dieser Prozess der Standardisierung und Institutionalisierung bis ins 19. Jahrhundert andauerte, war es die maßgebliche Leistung des 17. Jahrhunderts, die Argumentation auf Basis experimenteller Ergebnisse

11 Es ist kein Zufall, dass ab dem 14. Jahrhundert die ersten Papiermühlen in den intellektuellen Zentren gegründet wurden (Bologna 1293, Padua 1340, Troyes 1338, Nürnberg 1390). Mit der Erfindung des Buchdrucks entstanden ab dem 15. Jahrhundert die ersten Druckereien. Um 1500 gab es europaweit bereits mehr als 1.000 Drucker und Verleger, die 27.000 Titel mit einer geschätzten Gesamtauflage von insgesamt eins- bis acht Millionen Bänden druckten. Im 17. Jahrhundert waren bereits über eine Million unterschiedlicher Titel im Umlauf. 1682 erschien mit den Leipziger *Acta eruditorum* das erste wissenschaftliche Journal im deutschsprachigen Raum (vgl. Flasch 1995: 146f; Hiebel 1997: 49ff).

12 „Um die Mitte des achtzehnten Jahrhunderts war das Staunen der Naturphilosophie fremd geworden und noch dazu in schlechte Gesellschaft geraten. ... Die Pariser Académie Royale des Science war so besorgt darum, dieser verbreiteten ‚Liebe zum Staunen‘ keinen Vorschub zu leisten, dass sie sich jahrzehntelang weigerte, Berichten über Meteoriten Glauben zu schenken, weil vom Himmel fallende Steine einen Beigeschmack von Wunderzeichen hatten“ (Daston 2001: 92).

wissenschaftlich zu etablieren. Dabei lieferten die instrumentenbasierten Experimente und Beobachtungen eine wachsende Sammlung von Fakten, die es mit Hilfe von Annahmen und Theorien zu erklären galt. Auch hier waren geeignete Praktiken und Standardisierungen gefordert. Erfahrene Experimentatoren wie Robert Boyle kritisierten die Lust ihrer Kollegen an spekulativen Interpretationen magerer, experimenteller Befunde und forderten „that men, in the first place, would forbear to establish any theory, till they have consulted with [...] a considerable number of experiments, in proportion to the comprehensiveness of the theory to be erected on them. And, in the next place, I would have such kind of superstructures looked upon only as temporary ones“ (Boyle 1661 in: Crombie 1994: 948). Auch wenn von systematischer, theoriegeleiteter Wissenschaft noch nicht die Rede sein konnte – und dessen waren sich die frühen neuzeitlichen Forscher durchaus bewusst – so stellte die sorgfältige Sammlung von Fakten und Beobachtungen die Grundlage für spätere Systematisierungen dar.¹³ Bernard de Fontenelle forderte daher 1709 im Programm der Pariser Académie des Science: „Die Akademie ist auf der ersten Stufe, auf der sie einen großen Bestand von gut begründeten Beobachtungen und Tatsachen sammelt, die eines Tages die Grundlage für ein System sein werden. Denn die systematische Physik muß von der Errichtung ihres Gebäudes solange Abstand nehmen, bis die experimentelle Physik in der Lage ist, sie mit den nötigen Materialien zu versorgen“ (Fontenelle 1709, übersetzt in: Böhme, van den Daele, Krohn 1977: 190).

Doch worauf sollte eine systematische Wissenschaft basieren, auf empirischen Ordnungen oder allgemeinen Prinzipien? Für Bereiche, die der direkten Beobachtung zugänglich waren und eine Fülle an Erscheinungen boten wie die Botanik, die Biologie oder die Mineralogie, wurden seit der Antike Versuche unternommen, diese zu klassifizieren. Dabei dienten die empirischen Ordnungen dem Zweck, die unüberschaubare Fülle von Einzelercheinungen zu strukturieren. Bereits Aristoteles hatte in seinen botanischen Studien über sechshundert Pflanzenarten aufgelistet. Im 17. Jahrhundert waren bereits mehr als sechstausend Pflanzenarten bekannt und bis Mitte des 20. Jahrhunderts waren es achtzehntausend. Anhand von Beobachtungsvariablen bestimmten Botaniker rele-

13 Während den Baconischen Wissenschaften theoretische Entwicklungslinien fehlten – Thomas Kuhn bezeichnete diese Phase in seiner Studie *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* als strukturlosen Empirismus (vgl. Kuhn 1962) – sind Astronomie, Mechanik und Optik bereits im 17. Jahrhundert systematische, d.h. theoriegeleitete Wissenschaften, die Empirie mit mathematisierter Theorie verbinden.

vante Merkmale, auf deren Basis sie dann durch Merkmalskombinationen und Unterscheidungen Klassifikationen entwickelten. Dabei kam es vor, dass sich Klassifikationssysteme als hinderlich für den Erkenntnisfortschritt erwiesen.¹⁴ In seiner *Geschichte der Botanik* vom 16. Jahrhundert bis 1860 schrieb Julius Sachs:

„Die Botaniker in den letzten drei Decennien des 17. Jahrhunderts mussten erkennen, daß die von Lobelius und Bauhin aufgestellten Verwandtschaftsreihen auf dem von Caesalpin betretenen Weg durch a priori festgestellte Merkmale nicht charakterisiert und nicht zu einem wohlgegliederten System ausgebildet werden können“ (Sachs 1875: 69). „Eine beinahe 300jährige ununterbrochene Arbeit, welche immer wieder von dem selben Grundsatz ausging oder factisch sich doch in dieser Weise beschäftigte, hat den inductiven Beweis geliefert, dass der von Caesalpin [1583] eingeschlagene Weg ein Irrweg ist. Wenn dennoch bei der Verfolgung desselben bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts die natürlichen Verwandtschaftsgruppen immer deutlicher hervortreten, so geschah es, weil eben auch der auf einem Irrweg Begriffene nach und nach die Gegend, in welcher er umherirrt, immer besser kennen lernt und endlich ahnt, welcher Weg der richtige gewesen sein würde“ (Sachs 1875: 63).¹⁵

Ein Großteil der beobachteten Phänomene waren jedoch nicht Objekte, sondern Prozesse wie die Brechung des Lichts, die Verbrennung organischer Stoffe oder die Fortpflanzung von Lebewesen. Klassifikationen anhand von Beobachtungsmerkmalen lieferten kaum Informationen, denn Klassifikationen sind lediglich Beschreibungen und keine wissenschaftlichen Erklärungen. Erst empirisch fundierte Modelle und Theorien, basierend auf Experimenten und Messungen, ermöglichten entsprechende Erklärungen der Phänomene und Prozesse, um die zugrundelie-

14 Die frühen botanischen Systeme waren Mischgebilde künstlicher und natürlicher Ordnungen. Erst Carl von Linné beschränkte sich in seiner Abhandlung *Species Plantarum* von 1753 auf eine Art von Systematik. Basierend auf mehr als dreißig verschiedenen Beobachtungsvariablen erarbeitete er ein künstliches System von Klassen und Ordnungen, das sich unabhängig von natürlichen Pflanzenverwandtschaften auf die Form der Pflanzen konzentrierte. Allerdings wurde Linnés künstliches System stark kritisiert, schließlich erhoffte man sich von der natürlichen Ordnung Aufschlüsse über die Entstehung und Entwicklung der Pflanzenarten. Ähnliche Klassifikationen wurden im Laufe des Mittelalters und der Neuzeit für die Welt der Tiere, Gesteine oder chemische Verbindungen in zunehmend umfangreicherer Weise erstellt.

15 Andrea Cesalpino beschrieb in seinem *De Plantis Libri* 1583 bereits 840 Arten. „Caesalpin war der erste, der ein Pflanzensystem nach der Formverschiedenheit und Ähnlichkeit beschrieb ohne auf ihre Eigenschaften und Kräfte zu sehen. Mit ihm beginnt die wahre methodische Systematik“ (Schultz 1832: 17-18).

genden Prinzipien zu verstehen. Denn das Ziel der Naturforschung des 17. Jahrhunderts war es, die Gesetze der Natur in ihren Erscheinungen zu erkennen und diese zu formulieren. Vorbild war dabei die Astronomie und ihre Himmelsmechanik, die mit Newtons Mechanik auf die Bewegung aller physischen Objekte anwendbar wird und sich mathematisch formulieren lässt. Doch um „eindeutige Auskunft über die unbekannten Bestandteile und Kräfte in den verschiedenen Körpern zu erhalten“ (Bacon, 1642/1982: 55), müssen die Forscher tiefer blicken als es die Wahrnehmung erlaubt. Sie müssen ihren Blick anders gestalten als das natürliche Sehen, denn „[...]every natural action depends on things infinitely small, or at least too small to strike the sense,“ schrieb Bacon im *New Organon*. „No one can hope to govern or change nature until he has duly comprehended and observed them“ (Bacon 1620/2004: II. Buch VI). Der Wunsch, Einblicke jenseits des direkt Beobachtbaren zu gewinnen, zeigt sich in den verschiedenen Formen des wissenschaftlichen Blicks, die seit der Neuzeit die Forschung maßgeblich bestimmen: Im beobachtenden Blick mit Hilfe von Instrumenten in mikroskopische und makroskopische Bereiche. Im messenden Blick in Bereiche jenseits des Sichtbar- und Wahrnehmbaren. Im experimentellen Blick auf kausale Zusammenhänge. Im theoretischen Blick auf die den Phänomenen zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten und schließlich im mathematischen Blick auf allgemein formulierte Prinzipien. Diese Einblicke veränderten das, was wissenschaftlich als real galt und bis heute gilt. Vor allem mit dem Blick auf das Kausale versuchen die Forscher immer tiefer in die Phänomene einzudringen. „In the seventeenth century old practices changed and new ones appeared. Those changing practises represent shifts in the meaning of experience itself – shifts in what people saw when they looked at the events in the natural world“ (Dear 1995: 12-13).

Ohne Instrumente der Messung, der Beobachtung und des Experimentierens sind diese Einblicke nicht denkbar. Die Entwicklung leistungsfähiger und zunehmend genauerer Instrumente spielt daher eine maßgebliche Rolle im wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt, denn verbesserte oder neue Instrumente erlauben Einsichten in neue Bereiche, generieren neue Entdeckungen und erweitern wissenschaftliche Erfahrung. „Das Projekt der neuzeitlichen Wissenschaft leitet seine Macht aus dem spezifisch technologischen Charakter der Darstellungsräume her. Die Kräfte und die Art von Überlegungen, die sie freisetzen, ebenso wie die Regeln, denen sie gehorchen, sind weniger die von cartesischen Subjekten als vielmehr die von technologisch-epistemischen Texturen“ (Rheinberger 2002: 243, 244). Natur wird mit Hilfe experimenteller Versuchsanordnungen, systematischer Beobachtungen und instrumenteller Messungen rekontextualisiert. Der technologische Charakter leitet

sich dabei aus den methodischen und reglementierten Praktiken des Forschens ab, die zunehmend an Instrumente delegiert werden. Mit der fortschreitenden Standardisierung und Normierung dieser Praktiken erwirbt die neuzeitliche Wissenschaft die Fähigkeit, aus der Komplexität natürlicher Erscheinungen Phänomene zu isolieren, zu stabilisieren und unter kontrollierten Bedingungen beherrschbar zu machen. Diese ‚Revolution der Denkart‘, wie Immanuel Kant sie in seiner Vorrede zur *Kritik der reinen Vernunft* 1787 betitelte, setzte ein, als: „Galilei seine Kugeln die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen, oder Torricelli die Luft ein Gewicht, was er sich zum voraus dem einer ihm bekannten Wassersäule gleich dachte, tragen ließ ... Sie begriffen, dass die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurf hervorbringt“ (Kant 1787/1993: B XIII). Der Preis, den die Naturforschung dafür zahlen muss, ist die zunehmende Abhängigkeit von den immer komplizierter werdenden Apparaten. Die Konstruiertheit wissenschaftlicher Realitäten als Labor-Realitäten entfernt sich im Laufe der Wissenschaftsentwicklung immer weiter von der lebensweltlich erfahrbaren Realität.¹⁶ Aus heutiger Perspektive lässt sich feststellen, dass die „durch die Fundamentalaussagen eines Forschungsprogramms dargestellten Sachverhalte ... [sich] in der Regel überhaupt nicht in der ‚unberührten Natur‘ beobachten [lassen]. Es bedarf äußerst umfangreicher technisch-apparativer Vorkehrungen und die führen meist nicht zu einer vollständigen, sondern nur zu einer angenäherten Realisierung der Fundamentalaussagen eines Forschungsprogramms“ (Tetens 1987: 9).

Quantifizierung

Ein maßgeblicher Faktor der Rekontextualisierungen natürlicher Phänomene und Prozesse ist deren Quantifizierung. Quantifizierung schafft Ordnungen als ein Mehr oder Weniger, als ein Wärmer oder Kälter, ein Größer oder Kleiner, oder allgemein, als ein Schwächer oder Stärker einer Intensität. Quantitative Ordnungen unterscheiden sich von qualitativen, insofern sie das Nebeneinander der Zustände in eine Reihenfolge bringen. Qualitative Ordnungen können Klassen und Gruppen mit ähnlichen Merkmalen bilden, aber sie stellen keine Reihenfolgen innerhalb der Klassen oder zwischen diesen dar. Erst die Quantifizierung erlaubt eine

16 Laborforschungen rekonstruieren die aktuellen konstruktiven Prozesse der Forschung anhand von Fallstudien (vgl. beispielsweise Latour, Woolgar 1979; Knorr Cetina 1981; Lynch 1985; Rheinberger 2002).

komparative Ordnung der Phänomene und Prozesse.¹⁷ „Von einer bloß-empirischen, schlechthin ‚gegeben‘ Vielheit wird ausgegangen: aber das Ziel der theoretischen Begriffsbildung ist darauf gerichtet, sie in eine rational-überschaubare, in eine ‚konstruktive‘ Vielheit zu verwandeln. Diese Verwandlung ist niemals abgeschlossen – aber sie wird stets von neuem und mit immer komplexeren Mitteln in Angriff genommen. [... Dabei] wird den Phänomenen gewissermaßen gewaltsam ein anderer Ordnungstyp aufgedrückt“ (Cassirer 1929/1990: 482), der sie der rationalen Kontrolle zugänglich macht. Historisch zeigt sich dieser Prozess in der Verschmelzung von Beobachtung, Experiment und Messung. Nicht nur entdecken die Astronomen des 16. und 17. Jahrhunderts dank der Fernrohre neue Monde und die Naturforscher mit Hilfe des Mikroskops neue Welten jenseits der natürlichen Wahrnehmungsgrenze.¹⁸ Es dauert nicht lange, bis den Beobachtungen ein geometrisches Ordnungsraster unterlegt wird und diese dadurch metrisiert werden.¹⁹

Die Phänomene werden mit Hilfe von Messinstrumenten unter diesen neuen, da quantitativen Ordnungstyp subsumiert. Die typischen Messinstrumente der neuzeitlichen Experimentierstuben waren Pendel, Thermometer, Barometer, Luftpumpe, Waage und Kompass.²⁰ 1667

17 Dabei ist die Quantifizierung eine gängige Praktik, die so alt ist wie die Zahlen. Mit dem aufkommenden Merkantilismus des Mittelalters verstärkte sich jedoch ihr Einfluss auf alle Bereiche der Gesellschaft. „Die Zahlen, die Zählbarkeit der Dinge, die rationale Kontrolle und die Abzweckung auf Nützlichkeit prägte das merkantile Denken in den Handelszentren, die gegen 1300 die kulturelle Führung an sich gerissen hatten. Wenn nun ein Chronist über irgendeinen Vorgang berichtete, z.B. über einen Brückenbau, dann gab er Länge und Breite, Arbeitszeit und Zahl der Arbeiter präzise an“ (Flasch 1995: 484). Diese Praktik der rationalen Kontrolle wurde nach und nach in Form von Messung auf die Natur übertragen und ersetzte die qualitativen Erklärungen der aristotelischen Physik.

18 Im 17. Jahrhundert gelangen zahlreiche Entdeckungen mit Hilfe des Teleskops, aber auch des Mikroskops wie beispielsweise die 1661 von Marcello Malpighi dokumentierten mikroskopischen Befunde über die Kapillarendurchströmung in Zellen oder die 1683 von Anthony van Leeuwenhoek an die Royal Society gesandten Zeichnungen von Bakterien.

19 Zu Beginn des 18. Jahrhunderts wurden Mikrometer, feine Raster zur Bestimmung der Größenverhältnisse, mit Mikroskopen kombiniert. Dabei sind Messungen mehr als das Abzählen oder Ordnen sichtbarer Objekte. Sie stellen Vergleiche von Zuständen einer zu messenden Größe quantitativ dar und erfassen nicht sichtbare, oft auch nicht wahrnehmbare Größen der Phänomene und Prozesse. Allgemein gesprochen sind Messungen homomorphe Abbildung von Objekten und Zuständen auf Zahlen (vgl. Suppes, Zinnes 1963). Im einfachsten Falle heißt dies: Je intensiver der gemessene Effekt, desto größer der Zahlwert.

20 Grundlegend für die Entwicklung der neuzeitlichen Wissenschaft war die Verbesserung der Zeitmessung. Galileo hatte in seinen Studien zum Pen-

zählte Thomas Sprat bereits mehr als fünfzig Instrumente, die von Mitgliedern der Royal Society erfunden worden waren (vgl. Letwin 1963). Diese Instrumente wurden zu Beginn vor allem qualitativ genutzt. Aufgrund mangelnder theoretischer Bestimmungen der zu messenden Größen galten die Messungen mehr der experimentellen Untersuchung der Instrumente selbst, als den zu messenden Phänomenen. Erst im Wechselspiel zwischen empirischen Studien, theoretischen Entwicklungen sowie der experimentellen Überprüfung und Normierung der Apparate entwickelten sich die Messinstrumente von einfachen Anzeigen zu komplizierten Apparaten, die immer genauer wurden. So zog sich beispielsweise die Verbesserung der Wärmemessung von Galileos erstem Thermometer um 1600 über mehr als ein Jahrhundert hin, bis 1724 mit dem Gefrierpunkt von Wasser ein geeigneter Fixpunkt für die Vergleichbarkeit der Messungen gefunden worden war. Im Laufe der Zeit konnte Temperatur als Messgröße generalisiert und unabhängig von spezifischen Instrumenten exakt messbar gemacht werden. Dazu waren experimentelle und theoretische Arbeiten von Daniel Fahrenheit zur Konstanz des Eispunktes (1724), von Anders Celsius zur Abhängigkeit des Siedepunktes vom Luftdruck (1742), von Robert Boyle zur Kompressibilität von Flüssigkeiten (1662), von Jean-André Deluc zur Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten (1772) und anderen Forschern nötig (vgl. Böhme, van den Daele, 1977: 201ff). Die Instrumentenentwicklung, nicht nur die des Thermometers, unterläuft dabei charakteristische Stadien. Messungen unterschiedlicher Instrumente werden zunehmend miteinander vergleichbar und von den technischen Grenzen einzelner Instrumente unabhängig. Die damals geläufigen Basisgrößen sind die Länge, die Masse und die Zeit. „The numerical measures of angle, length, time and weight or mass continued to be the quantities in terms of which almost all other quantities were measured, even the newly quantified properties of physics such as ‚magnetic intensity’ or fluid pressure“ (Roche 1998: 52). Beispielsweise definierte Isaac Newton 1687 das Maß der Kraft als Produkt von Masse und Beschleunigung oder Carl Friedrich Gauß bestimmte 1838 die erdmagnetische Intensität durch die Basisgrößen Länge, Masse und Zeit.

Doch Messinstrumente alleine genügen nicht, um quantitativ aussagekräftige Resultate zu erzielen. Dazu bedarf es der Spezifizierung dessen, was aussagekräftig ist. Durchschnittswerte und Naturkonstanten spielen eine

del dessen Eigenschaften für die Zeitmessung entdeckt. Pendelschwingungen wurden zum wichtigsten Instrument wissenschaftlicher Zeitmessung, bis im 20. Jahrhundert Quarzkristallschwingungen und schließlich der Zerfall von Atomen für die Zeitbestimmung genutzt wurden.

entscheidende Rolle, denn sie geben Referenzpunkte zur Beurteilung der Resultate an. Um diese Werte zu ermitteln, bedarf es unzähliger Messungen und Berechnungen auf Basis gut bestätigter Theorien. Zudem wird eine Theorie der Fehlerrechnung benötigt, da jedes Messinstrument innerhalb einer Fehlerspanne operiert.²¹ Als Charles Babbage 1832 eine Tabelle mit allen damals bekannten Durchschnittswerten und Konstanten wie astronomische Größen, Atomgewichte, geographische, biologische und andere Größen veröffentlichte, hatte sich die Idee der Quantifizierung der Natur vollends durchgesetzt. Babbage brachte mit seiner Tabelle zum Ausdruck „was vielen seiner Zeitgenossen vorschwebte, nämlich daß man die Welt mit Hilfe einer Reihe von Zahlen definieren könne, und diese Zahlen sollten Konstanten heißen“ (Hacking 1996: 387).

Babbages Tabelle dokumentierte nicht nur die zunehmende Vermessung der Natur, sie kondensierte die Arbeit kollaborativer und zunehmend standardisierter Forschung eines ganzen Jahrhunderts.²² Schon im 17. Jahrhundert wurden von den Akademien, vor allem im Bereich der Meteorologie, groß angelegte Messprogramme initialisiert. So verfasste Robert Hooke bereits 1663 für die Royal Society *A Method for Making a History of the Weather*. Beobachtungsdimensionen wie Temperatur, Niederschlag oder Luftdruck wurden darin ebenso vorgeschrieben wie die Konstruktionen und Skalen der Messinstrumente sowie die tabellarischen Notierungsstandards.²³ Wie aufwendig die Organisation von Messkampagnen war, um geeignete Mittelwerte zu erhalten, zeigen die Aufzeichnungen von Carl Friedrich Gauß, die er in den 1830er Jahren über seine magnetischen Beobachtungen zur Bestimmung der Deklinationen machte. Deklinationen geben den Winkel zwischen der Richtung der magnetischen Feldlinien und der Richtung auf den geographischen Nordpol am Beobachtungsort an. Da sich die Abweichung zwischen dem magneti-

21 1809 gelang es Carl Friedrich Gauß eine solche Fehlertheorie zu formulieren, die er in seinem Werk *Theoria Motus Corporum Coelestium in sectionibus conicis solem ambientium* als Methode der kleinsten Quadrate publizierte (vgl. Gauß 1809, 1816; Knobloch 1992).

22 Die älteste bekannte Naturkonstante ist die Gravitationskonstante (G), die seit 1798 bekannt war. Andere sind die Elementarladung (e), die magnetische Feldkonstante (μ_0), die Lichtgeschwindigkeit (c) oder das Plancksche Wirkungsquantum (h).

23 1781 nahm die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft erstmals weltweit synchron Messungen vor. Ende des 19. Jahrhunderts gab es in Europa bereits ein gut ausgebautes Netz an Wettermessstationen. „In principle, everybody was measuring the same quantities. But instruments and practices remained discrepant, and it was enormously difficult to coordinate them. For years, as the Norwegian Vilhelm Bjerknes complained, the failure of coordination appeared on most weather maps in the form of a wholly artifactual cyclon over Strasbourg“ (Porter 1995: 27).

schem und dem geographischem Nordpol jährlich um einige Kilometer verschiebt, ändern sich die Deklinationen laufend. Die aktuellen Abweichungen müssen jedoch erfasst werden, um mit einem magnetischen Kompass navigieren zu können. Diese Abweichungen wurden bis ins 15. Jahrhundert als Messfehler gedeutet, da man das Magnetfeld für konstant hielt. Als 1634 Henry Gellibrand in London Messungen durchführte und diese mit Messungen von William Borough aus dem Jahr 1580 und Edmund Gunters Messungen von 1622 verglich (vgl. Gunter 1624a), stellte er die Veränderung der Deklination in London zwischen 1580 bis 1634 um etwa sieben Bogengrad fest und schärfte das Bewusstsein für die Variabilität der Deklinationen (Gellibrand 1935). Zweihundert Jahre nach Gellibrand startete Gauß in Göttingen seine umfangreichen Messungen des Erdmagnetfeldes, um einen *Atlas des Erdmagnetismus* zu erstellen. Unter seiner Leitung führte der Göttinger Magnetische Verein von 1836 bis 1841 eine internationale Messkampagne durch. An den Messungen, deren Vorgehen Gauß 1836 in der Schrift *Das in den Beobachtungsterminen anzuwendende Verfahren* festlegte, beteiligten sich bis zu fünfzig erdmagnetische Observatorien in aller Welt. Auf über achtzehn Seiten diskutierte Gauß die verschiedenen Aspekte, die es zu berücksichtigen galt, um vergleichbare Resultate über einen längeren Messzeitraum zu erzielen: An festgelegten Tagen waren im 5-minütigen Takt Messungen durchzuführen, um jeweils 289 Messresultate zu erhalten. Da die Greenwich Mean Time erst 1884 eingeführt wurde, mussten die an der Messung beteiligten Personen ihre Uhren auf eine bestimmte Zeit ausrichten, in diesem Fall die Göttinger Zeit. Die Anweisungen von Gauß gingen so weit, dass in der wärmeren Jahreszeit vor den Messungen darauf zu achten sei, ob sich „eine Spinne im Kasten“ (Gauß 1836: 551) befände, deren Netz die freie Schwingung der Magnethadel behindern könne. Auch den Einfluss der Beleuchtung bei nächtlichen Messungen auf das Ablesen der Skala oder die unterschiedlichen Sehschärfen der messenden Personen wurden besprochen.

15 ^h 29' 10"	865.2	866.35	} 867.16
30	867.5	866.85	
50	866.2	867.10	
30 10	868.0	867.65	
30	867.3	867.90	
50	868.5		

Abbildung 4: Berechnetes Beobachtungsergebnis vom 15. August 1836 für T 15:30:00 Uhr in Göttingen (Gauß 1836: 545)

Ein weiteres Problem ergab sich durch das von Gauß 1832 verbesserte Messinstrument, den Magnetometer. „Bei den viel grösseren Forderungen, die man an die Genauigkeit der Bestimmung durch die jetzt eingeführten Apparate machen kann und machen muss, kann aber von einer solchen unmittelbaren Bestimmung nicht mehr die Rede sein. Es steht nicht in unserer Macht, die Nadel des Magnetometers so vollkommen zu beruhigen, dass gar keine erkennbaren Schwingungsbewegungen zurückbleiben. [...] Es werden daher an die Stelle der unmittelbaren Beobachtung solche mittelbaren Bestimmungen treten müssen, zu denen eine vollkommene Beruhigung unnöthig ist“ (Gauß, 1836: 542). Gauß gibt verschiedene Möglichkeiten an, die Abweichungen auszugleichen: Zum einen per Hand, indem man das Minimum und Maximum der Schwingungsbewegung auf der Skala anzeichnet und das Mittel zwischen beiden nimmt. Zum anderen indem man für einige Zeitmomente um den eigentlichen Messzeitpunkt T Messungen durchführt und dann das Mittel als Endresultat daraus errechnet, wie in Abbildung 4 dargestellt. Als Mathematiker plädierte er für letztere Methode. Aufgrund all dieser Unsicherheitsfaktoren ging er davon aus, dass man „eben deshalb [...] zu einer genauen Bestimmung der Mittelwerthe erst durch mehrjährige Beobachtungen gelangen [wird] können“ (Gauß 1836: 560). Vier Jahre später veröffentlichte er gemeinsam mit Wilhelm Weber den *Atlas des Erdmagnetismus* mit umfangreichem Kartenmaterial der gemessenen Werte (vgl. Gauß 1840).²⁴

Drei Entwicklungen charakterisieren ab Mitte des 19. Jahrhunderts die zunehmende Vermessung der Welt durch die Wissenschaft. Die erste forcierte die Standardisierung der Messresultate durch internationale Kooperationen. Isolierte Messungen und Expeditionen, wie sie beispielsweise Alexander von Humboldt 1799 bis 1804 in Amerika unternahm, lieferten zwar wichtige Erkenntnisse, aber keine international vergleichbaren Messresultate.²⁵ Carl Weyprecht, Vordenker des 1. Internationalen Polarjahres, formulierte dieses Problem 1875 auf der 48. Versammlung der Deutschen Naturforscher und Ärzte in Graz: „Stellt man die wissenschaftlichen Resultate der vergangenen Expeditionen zusam-

24 Deklinationen werden in Isogonenkarten dargestellt. Eine der ersten Isogonenkarten stammt aus dem Jahre 1753 von Leonhard Euler. Seit 1979 werden die Veränderungen des Erdmagnetfeldes von Satelliten gemessen.

25 Alexander von Humboldt führte bei seiner Expedition in die Neue Welt rund fünfzig Messinstrumente mit sich. Das Resultat seiner Reisen publizierte er unter dem Titel *Voyage aux régions équinoxiales du nouveau continent, fait en 1799, 1800, 1801, 1802, 1803 et 1804* (vgl. Humboldt 1997).

men, so wird man finden, dass sie den darauf verwendeten Mitteln durchaus nicht entsprechen. [...] Mit den Mitteln, welche eine einzige neue Expedition zur Erreichung der höchsten Breite kostet, ist es möglich, diese sämtlichen Stationen auf ein Jahr zu beziehen. Die Aufgabe wäre die, mit gleichen Instrumenten zu möglichst gleichen Zeiten durch ein Jahr Beobachtungen anzustellen“ (vgl. Weyprecht 1875). Das 1. Internationale Polarjahr von 1882/1883 bildete den Auftakt zu international koordinierten Messkampagnen, wie sie heute in zahlreichen Wissenschaftsbereichen, insbesondere in der Klimaforschung, die Regel sind.²⁶

Die zweite Entwicklung basierte auf internationalen Absprachen und Konventionen zu Maßeinheiten. Am 20. Mai 1875 übernahmen zahlreiche Staaten in der Internationalen Meterkonvention das in Frankreich 1795 eingeführte metrische System. Normale wie das Urkilo oder der Urmeter, die der Kalibrierung von Messgeräten dienen, sollten Messungen weltweit vergleichbar machen.²⁷ 1884 wurde die Greenwich Mean Time, basierend auf der mittleren Sonnenzeit am Nullmeridian, dessen Verlauf die Internationale Meridian-Konferenz im Oktober 1884 durch das Observatorium in Greenwich festgelegt hatte, zur Weltzeit erklärt.²⁸ Dadurch ließen sich weltweit Messungen synchronisieren, indem sie von jedem Ort der Welt auf einheitliche und ortsunabhängige Raum-Zeit-Koordinaten bezogen werden konnten. Doch nicht nur die Forschung

26 1932/33 folgte das 2. Internationale Polarjahr und 1957/58 wurden die Messungen im Internationalen Geophysikalischen Jahr auch auf Gebiete außerhalb der Polarregionen ausgedehnt (vgl. Internationales Polarjahr 2008).

27 Metrische Einheiten werden heute im Internationalen Einheitensystem des BIMP Internationales Büro für Maß und Gewicht in Sèvres bei Paris geregelt. Bislang wurden sieben Basiseinheiten eingeführt – Kilo (kg), Meter (m), Sekunde (s), Ampere (A), Grad Kelvin (K), Candela (cd) und Mol (mol) – sowie zahlreiche abgeleitete Einheiten wie Pascal (Pa) für den Druck ($\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$), Hertz (Hz) für die Frequenz (s^{-1}), Coulomb (C) für die elektrische Ladung ($\text{s} \cdot \text{A}$) oder Newton (N) für die Kraft ($\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$) (vgl. Haustein 2001; BIMP 2009).

28 Bereits 1766 legte der Astronom Nevil Maskelyne seine Berechnungen des *Nautical Almanac* auf die Ortszeit des Observatoriums von Greenwich aus. 1972 wurde die Greenwich Mean Time durch die koordinierte Weltzeit (UTC), die immer noch am Greenwich Nullmeridian ausgerichtet ist, abgelöst. Seit den 1970er Jahren vollzieht sich eine Zeitnormierung ganz anderer Art. Die Zeitdefinition des Computerbetriebssystems UNIX, die seit dem 1. Januar 1970 00:00 h UTC die vergangenen Sekunden zählt, hat sich im Computerbereich als UNIX-Epoche gegen die UTC durchgesetzt. (1218126923 UNIX Zeit entspricht dem 7.8.2008 um 18:25:23 h UTC.) Da die UNIX-Zeit jedoch Schaltsekunden nicht berücksichtigt, sind die Zeitsysteme nicht eindeutig aufeinander abbildbar.

forderte zunehmend Standardisierungen ein. Im Zuge der industriellen Revolution und ihrer technischen Produkte gewannen Normierungen praktisch wie ökonomisch an Bedeutung. Es ist kein Zufall, dass Wissenschaftler und Ingenieure gemeinsam – Karl-Heinrich Schellbach, Werner von Siemens und Hermann von Helmholtz – 1887 in Berlin die Gründung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorantrieben.²⁹ Die Reichsanstalt sollte als Eichamt fungieren und konnte bereits 1893 mit der Durchsetzung der elektrischen Einheiten auf dem Internationalen Elektrischen Kongress in Chicago ihren ersten Erfolg verbuchen (vgl. Vec 2006: 194).

Die dritte Entwicklung zeigte sich darin, dass zunehmend indirekte Messungen, die auf mathematischen Ableitungen basieren, eingeführt wurden. Während direkte Messungen aus dem Vergleich einer Messgröße mit einem vorher definierten Maßstab resultieren, werden indirekte Messungen in Bezug auf eine leicht zugängliche Größe bestimmt oder aus einer Kombination verschiedener Messgrößen abgeleitet.

„Überall daher, wo physikalische Größen nur auf diesem indirecten Weg gemessen werden können, sind mathematische Hilfsoperationen die Werkzeuge solcher Messung. Weil aber nur an verhältnismässig wenige unter den Erscheinungen, auf deren genaue Kenntnis es uns ankommt, unsere verschiedenen Maße direct angelegt werden können, so fällt die Mehrzahl der physikalisch wichtigen Größen einer indirecten Messung anheim, die in der mathematischen Ableitung der gesuchten Grössen aus anderen durch die directe Messung gefundenen besteht. Da alle physikalischen Maße auf Raummaße zurückführen, so bildet die geometrische Construction den natürlichen Ausgangspunkt dieser Hilfsoperationen, und erst an sie schliessen sich die arithmetischen Verfahrensweisen an, durch welche es schliesslich möglich wird, die gefundenen Größen in bestimmten Zahlenwerthen auszudrücken“ (Wundt, 1894: 416-417).

Ein Beispiel für verschiedene Möglichkeiten der Wärmemessung gibt Carl Runge in seinem Kapitel über *Indirekte Vergleiche und Messungen* in der *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*. Die 1887 vom Comité International des Poids et Mesures festgelegte Definition der Temperatur durch das Wasserstoffthermometer, bezogen auf den Gefrierpunkt von Wasser unter normalem atmosphärischem Druck als Nullpunkt, lässt sich auch als Strahlungsenergie schwarzer Körper be-

29 Für moderne Messsysteme gelten normierte Prüfvorschriften zur Evaluierung der Messabweichungen, um Genauigkeit, Kalibrierung, Wiederholpräzision und Vergleichbarkeit festzulegen. Die seit 1942 bestehende DIN Norm 1319 regelt die *Grundbegriffe der Meßtechnik; Messen, Zählen, Prüfen* (vgl. DIN 2009).

stimmen. „Danach heißen zwei Temperaturen einander gleich, wenn die Energie der Strahlung, welche ein Oberflächenteil des schwarzen Körpers von gegebener Fläche in gegebener Zeit in einem gegebenen Raum entsendet, bei beiden Temperaturen die gleiche ist. Zwei Temperaturunterschiede sollen gleich heißen, wenn die Unterschiede der Strahlungsenergie einander gleich sind“ (Runge 1902: 8). Damit erhält man eine Skala, jedoch keinen Nullpunkt als Referenzpunkt. Beide Skalen – Wasserstoffthermometer und Strahlungsenergiemessung – sind keine ähnlichen Abbildungen aufeinander. „Es zeigt sich aber, dass bei geeigneter Annahme der Nullpunkte die Abbildung durch eine einfache rechnerische Beziehung der Zahlen dargestellt wird, soweit die Beobachtungen reichen. Die Zahlen des Wasserstoffthermometers sind bei geeigneter Annahme der Nullpunkte sehr nahe proportional den vierten Wurzeln der Zahlen aus den Skalen der Strahlungsenergien“ (Runge 1902: 8). Durch dieses indirekte Verfahren lässt sich anhand der Helligkeitsmessung die Temperatur für Körper bestimmen. Vor allem die Astronomie nutzt dieses indirekte Verfahren zur physikalischen Fernerforschung der Sterne. Im 19. und 20. Jahrhundert wurden die unterschiedlichsten Zusammenhänge zwischen Temperatur und physikalischen Effekten entdeckt, wie die Veränderung des elektrischen Widerstandes in Metallen, die Diffusion und der Brechungsindex von Gasen oder die Drehung der Polarisationssebene in Quarz, und für Temperaturmessungen genutzt.

Mathematisierung und Momentum

Quantifizierung, Standardisierung und Koordinierung instrumentenbasierter Einsichten auf Basis immer genauer arbeitender Messinstrumente leiten Mitte des 19. Jahrhunderts einen Wandel der Forschungslogik ein. Während zu Beginn der Neuzeit Beobachtung, Experiment und Messung noch weitgehend voneinander getrennt sind, da die vereinheitlichende Struktur der Quantifizierung noch wenig ausgebildet ist, fallen im Laufe der Wissenschaftsentwicklung alle drei Formen der empirischen Erkenntnisproduktion zusammen. Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass in der Quantifizierung, Standardisierung und Koordinierung empirischer Forschung die zunehmende Mathematisierung der Wissenschaft zur Entfaltung kommt.

„Es ist höchst bemerkenswert,“ schreibt 1947 Max Planck rückblickend auf die Entwicklungen in der Physik, „daß, obwohl der Anstoß zu jeder Verbesserung und Vereinfachung des physikalischen Weltbildes immer durch neuartige Beobachtungen, also durch Vorgänge in der Sinnenwelt, geliefert wird, den-

noch das physikalische Weltbild sich in seiner Struktur immer weiter von der Sinnenwelt entfernt, daß es seinen anschaulichen, ursprünglich ganz anthropomorph gefärbten Charakter immer mehr einbüßt, daß die Sinnesempfindungen in steigendem Maße aus ihm ausgeschaltet werden – man denke nur an die physikalische Optik, in der vom menschlichen Auge gar nicht mehr die Rede ist – daß damit sein Wesen sich immer weiter ins Abstrakte verliert, wobei rein formale mathematische Operationen eine stets bedeutendere Rolle spielen und Qualitätsunterschiede immer mehr auf Quantitätsunterschiede zurückgeführt werden“ (Planck 1947a: 14).³⁰

Die Voraussetzung für die von Max Planck angesprochene Mathematisierung der Physik liegt in der Transformation der Mathematik zu Beginn der Neuzeit. Diese lässt sich am plakativsten als Transformation von der geometrischen Anschaulichkeit und Konstruierbarkeit in die abstrakte Darstellung der Algebraisierung und Arithmetisierung der Geometrie charakterisieren. Oder mit den Worten von Felix Klein gesprochen:

„Gemeinhin verbindet man mit dem Begriffe der Mathematik schlichtweg die Idee eines streng logisch gegliederten auf sich selbst ruhenden Systems, wie uns ein solches etwa in der *Geometrie* des Euklid entgegentritt. Indes ist der Geist, aus dem die moderne Mathematik geboren wurde, ein ganz anderer. Von der Naturbeobachtung ausgehend, auf Naturerklärung gerichtet, hat er ein philosophisches Prinzip, das *Prinzip der Stetigkeit* an die Spitze gestellt. So ist es bei den großen Bahnbrechern bei Newton und Leibniz, so ist es das ganze 18. Jahrhundert hindurch, welches für die Entwicklung der Mathematik recht eigentlich ein Jahrhundert der Entdeckungen gewesen ist. Allmählich erst erwacht wieder eine strenge Kritik, welche nach der logischen Berechtigung der kühnen Entwicklungen fragt“ (Klein 1895: 232).

Diese Transformation spielt für die Entwicklung der neuzeitlichen Naturwissenschaft eine ebenso große Rolle wie die Einführung des Experiments. Der Auftakt zu dieser Entwicklung liegt in der Ablehnung des vorherrschenden, auf der klassischen Geometrie basierenden Wissenschaftsideals. Die experimentellen Naturforscher wenden sich am Beginn der Neuzeit nicht nur gegen die theologischen Spekulationen, sondern auch gegen die *Demonstratio more geometrico*, also die aus geoem-

30 Zwar hatte Planck bereits die weit reichenden Folgen der Mathematisierung, die Formulierung des Quantenprinzips (vgl. Planck 1900) und des Relativitätsprinzips (vgl. Einstein 1905), vor Augen. Vorbereitet wurde diese Entwicklung eines neuen Forschungsstils jedoch bereits Mitte des 19. Jahrhunderts, beispielsweise in Wilhelm Webers Arbeiten zur Elektrodynamik, der wiederum die erdmagnetischen Forschungen von Gauß zum Vorbild nahm (vgl. Weber 1846).

trischen Axiomen abgeleiteten Folgerungen. In seinen *Hydrostatical paradoxes* von 1666 formulierte Robert Boyle diese Auffassung deutlich. „And, about the very Subjects we are now upon, the following Paradoxes will discover so many mistakes of eminent writers, that pretend to have Mathematically demonstrated what they teach, that it cannot but make wary Naturalists [...] be somewhat diffident of Conclusions, whose proofs they do not well understand. And it cannot but, to such, be of great satisfaction to find the things, that are thought them, verified by the visible testimony of Nature herself“ (Boyle 1666: Einleitung). Experimentelle Physik – Pneumatik, Hydrostatik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre, etc. – bleibt bis ins 19. Jahrhundert qualitativ orientiert. „Unlike physico-mathematics, experimental physics was not presented in a mathematical framework until the nineteenth century“ (Roche 1998: 51).

Zum anderen wird in der Astronomie und später in der Mechanik die Mathematisierung den Beobachtungen angepasst, indem geometrische Modelle induktiv aus den Daten gewonnen werden. Noch in seinem Frühwerk, *Mysterium Cosmographicum* von 1596, versuchte Johannes Kepler die Harmonie des Kosmos geometrisch-spekulativ auf Basis der Platonischen Körper zu erklären.³¹ Doch schon in seiner *Astronomia Nova* trug er 1609 dem Problem Rechnung, dass Tycho Brahes Beobachtungsdaten der Marsumlaufbahn, in die er als dessen Nachfolger 1602 Einsicht erhalten hatte, nicht mit den von Claudius Ptolemäus berechneten epizyklischen Bahnen übereinstimmten.³² In jahrelangen Be-

31 Im *Timaeus* beschrieb Platon fünf regelmäßige Körper als Erklärungsgrundlage der Materie und ihrer Eigenschaften – Tetraeder (Feuer), Würfel (Erde), Oktaeder (Luft), Ikosaeder (Wasser), Dodekaeder (Himmelsmaterie) – und folgte damit der pythagoreischen Tradition mathematisch-spekulativer Naturtheorien. „Greek geometers and applied mathematicians found many ways of applying geometry to nature and to artifacts, without sacrificing its ideal character. All of the Greek exact science and arts, including the Pythagorean science of musical harmonics, geometrical astronomy, solar horology, geodesy, cartography, ray optics, the theory of machines, the determination of centers of gravity and hydrostatics were heavily geometrical“ (Roche 1998: 38).

32 Claudius Ptolemäus hatte in den dreizehn Büchern des *Almagest* ca. 150 n. Chr. versucht, die Beobachtungsdaten mit dem aristotelischen, geozentrischen Modell kreisförmiger Planetenbahnen zur Deckung zu bringen. Dazu konzipierte er ein epizyklisches Modell, in dem die Planeten kleine Kreise entlang eines größeren Kreises durchlaufen. Das ptolemäische Epizykloiden-Modell deckte sich weitgehend mit der Mess(un)genauigkeit der antiken Beobachtungsdaten. Auch Nikolaus Kopernikus konzipierte sein heliozentrisches Modell als epizyklisches Modell. Erst Johannes Kepler führte 1609 die ellipsenförmige Bahn aufgrund wesentlich genauerer Beobachtungsdaten der Planetenbewegung ein.

rechnungen extrahierte Kepler aus Brahes Beobachtungsdaten die tatsächliche Gestalt der Planetenbahn des Mars und passte schließlich die Geometrie als Modell ellipsenförmiger Bahnen den Beobachtungen an. Resultat seiner Bemühungen waren die ersten beiden Keplerschen Gesetze, auf deren allgemeiner Herleitung Newton später seine Mechanik aufbaute. Diese induktive Vorgehensweise Keplers revolutionierte die Astronomie und im Anschluss daran die Mechanik. In diesem Sinne ist auch Galileos Auffassung zu deuten, wenn er die Ordnung der Phänomene durch Mathematik gestaltet sieht. „Philosophie steht in diesem großen Buch – ich meine das Universum – das stets offen vor uns liegt; aber wir können es erst verstehen, wenn wir Sprache und Buchstaben verstehen, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben,“ formulierte Galileo 1623 im *Il Saggiatore*, „seine Buchstaben sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Wort daraus zu verstehen“ (Galileo 1623, übersetzt in: Losee 1977: 25, 26). Selbst wenn sich die geometrisch inspirierten Modelle zunehmend den Beobachtungsdaten anpassen, so verdeutlicht Galileos Bemerkung doch den hohen Idealisierungsgrad dieser Modelle aufgrund ihrer idealisierten Elemente.

Der wirklich revolutionäre Schritt, hin zu einer neuzeitlichen und modernen Form der Mathematisierung von Wissenschaft, basierte jedoch auf der Integration neuer Konzepte in die Geometrie und damit auf ihrer Transformation in Analytische und Differential Geometrie. Diese Entwicklung setzt ein, als sich Naturforscher und Mathematiker zunehmend für die konzeptuelle Handhabung von Bewegung interessieren. Statt der statischen, auf Endlichkeit und Anschaulichkeit konzentrierten klassischen Geometrie mit ihrem Ideal der Konstruierbarkeit verhaftet zu bleiben, werden nun die Konstruktionsmechanismen selbst – Herstellung geometrischer Figuren mit Zirkel und Lineal auf Papier – mit Hilfe der Algebra operationalisiert. Dazu müssen die, zuvor per Hand ausgeführten oder gedachten Bewegungen, in typographische Operationen übersetzt werden. Vorbild sind zeichenbasierte, sukzessive Bewegungen in Form von Zahlen und Reihenbildung. Voraussetzung dafür ist die Verknüpfung der beiden mathematischen Darstellungssysteme – konstruktive Geometrie einerseits, operative Algebra und Arithmetik andererseits – wie sie 1637 von René Descartes in seiner *Geometrie* vorgeschlagen wurde, indem er auf das im 16. Jahrhundert von Francois Vieta eingeführte Rechnen mit Buchstaben zurückgreift. Dies führt zur algebraischen und arithmetischen Generierung geometrischer Figuren in der Weise, dass „die verschiedenen Gestalten der ebenen Kurve dadurch

entstehen,“ schreibt Ernst Cassirer in seiner Untersuchung zu *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, „daß wir einem bestimmten Punkt, den wir als Grundelement fixieren, relativ zu einer vertikalen und einer horizontalen Achse, verschiedene Arten des Fortschritts vorschreiben. Aus der Festhaltung und Vereinigung dieser Fortschrittsarten muß sich die Bestimmtheit der Linien, die auf diese Weise als ‚Bahnen‘ von Punkten erzeugt werden, zuletzt vollständig und eindeutig ableiten lassen. [...] Die anschauliche geometrische Linie löst sich kraft dieses Verfahrens in eine reine Wertfolge von Zahlen auf, die durch eine bestimmte arithmetische Regel miteinander verknüpft sind“ (Cassirer 1910: 94, 95). Die Bewegung der Punkte – ob als sinnliche Vorstellung oder geometrisches Konstruieren – wird zu einer aufeinander bezogenen, regelbasierten Relation innerhalb eines, durch Koordinaten metrisierten Raumes. Descartes gelingt damit die Kalkülisierung der Geometrie als typographisches Operieren.³³ Doch er lässt nur solche Kurven gelten, die sich durch arithmetische Regeln konstruieren lassen. So genannte transzendente Kurven werden von ihm explizit ausgeschlossen. Damit wird der Anwendungsbereich dieser frühen analytischen Geometrie erheblich eingeschränkt.

Der nächste Schritt besteht deshalb darin, den Verlauf einer Bahn aus dem Punkt selbst heraus zu bestimmen, wobei die Verlaufsbestimmung über die arithmetische Operationalität hinausgeht. Dazu bedarf es zum einen der Durchdringung des Zahlenbegriffs mit dem Funktionsbegriff, der neue Relationen zwischen den Größen ermöglicht. Tatsächlich taucht der Begriff ‚Function‘ erstmals 1694 bei Leibniz auf und nimmt in den folgenden Diskussionen mit Jakob Bernoulli und später durch Leonhard Euler allmählich Gestalt an (vgl. Leibniz 1694; Euler 1748). Zum anderen muss sich die Vorstellung durchsetzen, dass geometrische Figuren wie Linien, Flächen und Körper aus unendlich vielen Punkten ohne Größen bestehen.³⁴ Akzeptiert man diese Vorstellung und damit die Lockerung des Exaktheitsanspruches der endlichen Geometrie – denn die neuen Relationen sind nur dann handhabbar, wenn unendlich

33 „So, wie die Einführung des Ziffernrechnens die Zahlbildung ablöste vom Zählen und zurückführte auf das regelgeleitete Herstellen von Ziffernkonfigurationen, wird die Bildung von Typen geometrischer Gegenstände zurückgeführt auf das regelgeleitete Erzeugen von Buchstabenkonfigurationen. Konstruieren wird zum typographischen Operieren“ (Krämer 1991: 151).

34 Der Umgang mit infinitesimalen Größen bleibt nicht unwidersprochen. Beispielsweise greift George Berkeley in seiner Streitschrift *The analyst: or a discourse addressed to an infidel mathematician* die neue Mathematik und Naturlehre von Newton und Leibniz heftig an (vgl. Berkeley 1734/1951).

kleine Terme in den Berechnungen vernachlässigt werden können – dann werden Abstraktionen für Näherungsverfahren, wie die von Isaac Barrow geschilderte, möglich: „Wenn in die Berechnung ein unendlich kleines Stück einer Curve eingeht, so wird stattdessen ein richtig gewähltes Stück der Berührungslinie oder irgend eine wegen der unendlichen Kleinheit des Curvenstücks gleichwerthige gerade Strecke genommen“ (Barrow 1670, übersetzt in: Cantor 1901: 135).

Doch noch fehlt ein Kalkül zur Erzeugung solcher Kurvengebilde. Ein derartiger Algorithmus muss folgendes leisten: „Die Synthese [...] unendlich vieler Richtungsbestimmtheiten zu einem einheitlichen, bestimmten Gebilde“ zusammenzufassen (Cassirer 1910: 97). Interessanterweise haben sich zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen der symbolbasierten Generierung von Kurven herausgebildet, die in jeweils eigener Weise den neuen Begriff des Infinitesimalen begreifen: Entweder lässt sich eine Kurve aus der Bewegung eines Punktes entstehend denken oder als unendliches Vieleck permanenter Richtungsänderungen. Newtons Momentum und dessen Fluxionen³⁵ sowie Leibniz' infinitesimale Dreieckchen dokumentieren diese verschiedenen Denkansätze, die Ende des 17. Jahrhunderts zu einem Kalkül der Infinitesimalrechnung führen. Während Newton, durch physikalische Überlegungen inspiriert, die Momentangeschwindigkeit eines bewegten Körpers mit Hilfe seiner Fluxionsmethode zu ermitteln sucht, geht Leibniz geometrisch anhand des Tangentenproblems vor. „Am 29. October 1675 erfolgt der grosse Schritt der Erfindung des neuen Algorithmus [durch Leibniz]. [...] es wird nützlich sein \int statt omnia zu schreiben, um die Summe einer Gesamtheit zu bezeichnen. Hier zeigt sich, heisst es in der an demselben Tag geschriebenen Fortsetzung weiter, eine neue Gattung des Calcüls, sei dagegen $\int l = ya$ gegeben, so biete sich ein entgegengesetzter Calcül mit der Bezeichnung $\int l = ya/d$ [...]: Wie nämlich \int die Abmessung vermehrt, so vermindert sie d . \int aber bedeutet Summe, d Differenz“ (Cantor 1901: 166).³⁶ Mit diesem Kalkül eröffnet sich der Bereich transzenden-

35 Die Geschwindigkeitsveränderung der einzelnen Fluenten heißen bei Newton Fluxionen und sind Ableitungen der Momentangeschwindigkeit.

36 Zwischen Newton und Leibniz kam es zu einem Streit, wer der Erfinder des Differentialkalküls sei. Newton stellte seine Schrift *De methodis serierum et fluxionum* 1671 fertig, die jedoch erst 1736 veröffentlicht wurde. In dieser Schrift wie auch in seinem Hauptwerk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* von 1687 beschreibt er die Fluxionsrechnung. Leibniz konzipierte 1673 in seiner Schrift *Novae methodus pro maximis et minimis* die Differentialrechnung, die im Oktober 1684 in den *Acta eruditorum* erschien. Jason Bardi beschreibt in seiner Studie *The Calculus Wars* detailliert die Verwicklungen zwischen Newton und Leibniz (vgl. Bardi 2006). Auch Moritz Cantor beschreibt in seinen vierbändigen Vorlesungen

ter Gleichungen, in die unendlich kleine Größen eingehen und die Leibniz mit seinem ‚nouveau calcul des transcendantes‘ zu konstruieren in der Lage ist.³⁷ Der Preis ist der Verlust der Anschaulichkeit dieser Kurven, die sich nur noch algebraisch begreifen lassen, sowie die Aufgabe des Exaktheitsanspruches der antiken Geometrie. Zudem sind viele Regeln der Infinitesimalrechnung nur durch Intuition und Praktikabilität motiviert. Erst im 19. Jahrhundert versucht man, die Infinitesimalrechnung in der für die Mathematik übliche logischen Strengen zu begründen.

Nichtsdestotrotz schafft die Transformation der Geometrie die Grundlagen der neuzeitlichen und modernen Mathematisierung der Wissenschaft, welche es erlauben, die physikalischen Grundbegriffe in ihrer relationalen Veränderlichkeit zu erfassen, in mathematische Formeln zu übersetzen und analytisch zu behandeln. Physikalische Phänomene werden nicht mehr qualitativ, sondern quantitativ in einem raum-zeitlichen Raster als reine Wertefolgen von Zahlen verortet erfasst. Ihre relationale Veränderlichkeit wird in Form quantitativer Bilder – zumeist als Kurvenverläufe für einfache Abhängigkeiten – darstellbar und operational handhabbar. Bereits Isaac Barrow nutzte in seinen *Lectiones opticae et geometricae* von 1670 quantitative Bilder zur Versinnbildlichung physikalischer Vorgänge. Senkrecht zur Zeitlinie gezogene Geraden dienten ihm zur Veranschaulichung von Momentangeschwindigkeiten, die je nach Geschwindigkeit eine unterschiedliche Länge aufweisen. Dabei ergeben die geometrische Darstellung der Zeitlinie und einiger Augenblicksgeschwindigkeiten eine Zusammenschau der vollzogenen Bewegung: beispielsweise bei gleichförmig abnehmender Geschwindigkeit ein spitz zulaufendes Dreieck. Ungleichförmige und zusammengesetzte Bewegungen hingegen erzeugen komplexere Gebilde, für die Barrow

zur *Geschichte der Mathematik* ausführlich die Entstehung der Infinitesimalrechnung inklusive des Prioritätenstreites der Anhänger von Newton und Leibniz (vgl. Cantor 1901: Abschnitt XVII). Interessant ist folgende Einschätzung Cantors: „Wir haben das Hauptgewicht auf die Bezeichnung legen zu müssen geglaubt. Das steht im Zusammenhang mit unserer wiederholt ausgesprochenen Ansicht, dass die Infinitesimalbetrachtungen selbst schon vor Newton und Leibniz so weit gediehen waren, dass es hauptsächlich auf die Erfindung einer zweckmäßigen Bezeichnung ankam, ehe wesentliche Fortschritte möglich waren“ (Cantor 1901: 167). Es ist Leibniz’ Notation, die sich durchsetzt.

37 Diese Kurven sind zum Teil visuell nicht mehr darstellbar. Sie sprengen den Darstellungsbereich der Geometrie, lösen die Analysis von der geometrischen Anschaulichkeit und verhelfen der algebraischen Formel zur Autonomie.

die Tangentenberechnung, eine Vorform der Infinitesimalrechnung, nutzte.³⁸

Einen ersten Höhepunkt findet diese physico-mathematische Betrachtungsweise in Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (vgl. Newton 1687). Physikalische Vorgänge werden als Wechselwirkungen von Raum, Zeit und Materiepunkten betrachtet. Entsprechend des Trägheitsgesetzes bewegen sich diese, zu Körpern zusammengefassten Materiepunkte auf determinierten Bahnen im metrisierten Raum, seien es Planeten, Billardkugeln oder Sandkörnchen. Newton orientierte sich dabei an Descartes mechanistischem Konzept, auch wenn er Begriffe wie den der Bewegung neu fasste. „Die ‚Errungenschaften‘ dieses Weltbildes [von Descartes] waren: ein neuer Begriff der Materie (Extension als physische Substanz), die Beseitigung des Unterschieds von himmlischer und irdischer Physik, die Errichtung eines neuen Erklärungsideals (physische Prozesse galten als erklärt, wenn sie auf Stoffprozesse zurückgeführt waren), die Formulierung universeller Prinzipien für diese Erklärungen (Erhaltung der Bewegungsgröße, Trägheitsgesetz)“ (Böhme 1977: 242). Die Bahnen der Materialpunkte werden mit Hilfe der Fluxionsmethode näherungsweise berechenbar. „Die Einheit,“ schreibt Newton, „für die Augenblicksveränderung ist Oberfläche wo es um Körperinhalte, Linie wo es um Flächenräume, Punkt wo es [...] um Längen sich handelt, und ich scheue mich nicht von Punkten oder unendlich kleinen Linien als Einheiten zu reden“ (Newton 1669, übersetzt in: Cantor 1901: 160). Die Geometrie erlaubt es Newton, die physikalischen Begriffe als Maße – bezogen auf Raum und Zeit – zu definieren. Dadurch wird es möglich, „den alten Begriff der Kraft zu mathematisieren, indem ihr Maß definiert wird als das Produkt von Masse und Beschleunigung oder nach der ursprünglichen Form Newtons $F = m\ddot{s}$ (\ddot{s} = zweite Ableitung des Weges), woraus dann bei Leibniz die Formel für die ‚lebendige Kraft‘ $K = mv^2$ geworden ist. Dabei sind Masse sowie Geschwindigkeit und Beschleunigung zunächst durchaus als kontinuierliche Größen gedacht und werden auch mathematisch als solche behandelt“ (von Fritz 1971: 103). Erst wenn diese physikalischen Konzepte als raum-zeitlich differenzierbar aufgefasst werden, beginnt das Prinzip der Stetigkeit, das Felix Klein als das philosophische Prinzip der neuzeitlichen und modernen Mathematik der Naturerklärung bezeichnete, in

38 Barrow stand in engem Kontakt mit Newton und kannte dessen Fluxionsmethode lange bevor diese veröffentlicht wurde. Die Tangentenbestimmung wie von Barrow vorgeschlagen war bereits seit der Antike bekannt und wurde von Pierre de Fermat in *De maximis et minimis* 1629 algebraisch formuliert.

Form von Differentialgleichungen die Physik zu durchdringen. Diese Entwicklung findet 1788 mit Joseph-Louis Lagranges *Mécanique analytique* und 1798-1825 mit Pierre de Laplaces *Traité de mécanique céleste* einen vorläufigen Abschluss. In Lagranges Werk wird die Analysis auf die Theorie bewegter Körper in Form unzähliger Differentialgleichungen angewandt, ohne jegliche geometrische Darstellung.

Die Folge dieser neuen Forschungslogik ist nicht nur ihre zunehmende Unanschaulichkeit, sondern die Identifikation von wahrem Wissen mit mathematisch explizierbarem und berechenbarem Wissen, die zur dominanten Struktur der physikalischen Interpretation von Wirklichkeit wird: Empirische Einzeldaten lassen sich unter Gesetze subsumieren, die mit Hilfe mathematischer Gleichungen strukturiert, in die Zukunft extrapolierbar werden. ‚Hypotheses non fingo!‘ konstatierte Newton zur Rechtfertigung seiner mathematischen Annahmen. Damit kehrt sich die auf Aristoteles gründende Methode der Auflösung und Zusammensetzung der Phänomene in eine induktiv-deduktive Rekonstruktion der Phänomene. „When the Fellows adopted Newton as their champion, the mathematical sciences achieved their final triumph over scholastic natural philosophy. But in the process, those sciences had themselves mutated into something new, because explicitly experimental. When John Wilkins spoke of ‚Physico-Mathematicall-Experimentall Learning‘ as the intended business of the new Royal Society, he invoked a form of knowledge that Newton’s work would be the first fully to exemplify“ (Dear 1995: 247). Die Richtigkeit dieses Weltbildes scheint sich 1848 eindrucksvoll zu bestätigen, als Urban Le Verrier, allein auf Basis von Berechnungen, den Planeten Neptun entdeckte. Le Verrier hatte die Planetenbahn des Uranus unter der Annahme des Einflusses eines bis dahin unentdeckten Planeten per Hand berechnet. Seine Prognose wurde mit der tatsächlichen Entdeckung des Planeten Neptuns innerhalb einer Nacht von dem Astronomen Johann Galle des Berliner Observatoriums bestätigt (vgl. Galle 1846).

Die Metrisierung der physikalischen Begriffe, die Mathematisierung der physikalischen Theorie sowie die Erweiterung der Geometrie durch die Infinitesimalrechnung koordinieren Experiment, Messung und Theorie im selben Darstellungsraum: einem durch Koordinaten metrisierten, rein symbolischen Raum der Mannigfaltigkeiten. Allerdings erweitert sich dieser Symbolraum auf Seiten der mathematisierten Theorie durch immer komplexere Formen seiner Generierung in zunehmend abstrakterer Weise, während der empirische Anschauungsraum der orthogonalen Dreidimensionalität der euklidischen Geometrie verhaftet bleibt. Dies erlaubt einerseits die Konstitution neuer physikalischer Konzepte, bedarf

aber andererseits der Anpassung an die Struktur des empirischen Anschauungsraumes mit seiner Dreidimensionalität, die in den Netzen der Messpunkte und im experimentellen Setting erhalten bleibt. Je weiter jedoch die Mathematik in das Abstrakte vordringt, desto verwickelter wird das Kopplungsverhältnis zwischen empirischem Datenraum und physico-mathematischem Theorieraum. Die Folge ist Mitte des 19. Jahrhunderts die Zuspitzung der physico-mathematischen Forschungslogik im hypothetisch-deduktiven Forschungsstil der modernen Physik und Ingenieurwissenschaften. Dieser Forschungsstil setzt Experimentalforschung mit Präzisionsmessung gleich. Eindrucksvoll belegt wird dies durch den von Carl Friedrich Gauß 1838 in seiner *Allgemeinen Theorie des Erdmagnetismus* beschriebenen Zweck seiner Messungen.

„Vom höheren Standpunkt der Wissenschaft aus betrachtet ist aber diese möglichst vollständige Zusammenstellung der Erscheinungen auf dem Wege der Beobachtung noch nicht das eigentliche Ziel selbst: man hat damit nur ähnliches gethan, wie der Astronom, wenn er z.B. die scheinbare Bahn eines Kometen auf der Himmelskugel beobachtet hat. Man hat nur Bausteine, kein Gebäude, so lange man nicht die verwickelten Erscheinungen einem Princip unterwürfig gemacht hat. Und wie der Astronom, nachdem sich das Gestirn seinen Augen entzogen hat, sein Hauptgeschäft erst anfängt, gestützt auf das Gravitationsgesetz aus den Beobachtungen die Elemente der wahren Bahn berechnet, und dadurch sogar sich in den Stand setzt, den weiteren Lauf mit Sicherheit anzugeben: so soll auch der Physiker sich die Aufgabe stellen, [...] die die Erscheinungen des Erdmagnetismus hervorbringenden Grundkräfte nach ihrer Wirkungsart und nach ihren Grössenwerthen zu erforschen, die Beobachtungen so weit sie reichen, diesen Elementen unterwerfen, und dadurch selbst wenigstens mit einem gewissen Grade von sicherer Annäherung die Erscheinungen für die Gegenden, wohin die Beobachtung nicht hat dringen können, zu anticipiren“ (Gauß 1838: 122).

Das Unterwerfen der gemessenen Beobachtungen unter die mathematisierte Theorie ermöglicht es der physikalischen Forschung, hypothetische Annahmen aufzustellen. Dadurch wird das ontologische Primat der Empirie desavouiert und das Verhältnis von Theorie und Empirie bestimmt sich neu, denn die Annahmen sind nicht mehr zwingend an vortheoretische Beobachtungen gebunden. Sie müssen jedoch durch quantitative Prognosen der mathematisierten Theorie in der messenden Experimentalforschung bestätigt werden. Extrapolation wird im Zuge dieser Entwicklung zu einem wichtigen Forschungsinstrument, um quantifizierbare Prognosen aus der Theorie ableiten zu können. Wissen schaffen wird zunehmend zu einem Unterfangen der ins Unbekannte und in die Zukunft projizierenden Mathematik. „Wir [Mathematiker] sind daran

gewöhnt zu extrapolieren; das ist ein Mittel, die Zukunft aus der Vergangenheit und aus der Gegenwart abzuleiten“ (Poincare 1914: 17). Quantitative Prognose und Experimente als Präzisionsmessungen verzahnen sich dabei „zu einem eng verknüpften Forschungsprozeß. [...] Die Antwort, die das Experiment gibt, ist nicht mehr ein einfaches ‚ja‘ oder ‚nein‘, vielmehr ein gemessener Zahlenwert, der immer in gewissem Grade vom Erwartungswert differiert“ (Stichweh 1984: 232, 233).³⁹ Statt eines experimentellen Gelingens oder Fehlschlagens tritt nun die exakte Messung. Exakt, insofern Wissenschaft „allenthalben mit Maß und Zahl [rechnet]“ (Planck, 1941: 5), aber von da an auch den Grenzen der Präzision unterworfen ist, denn Messungen sind immer mit Fehlern behaftet und Infinitesimalberechnungen sind immer nur Näherungsverfahren. Tatsächlich wird das Ringen um Präzision zu einem entscheidenden Charakteristikum moderner Wissenschaft bis heute. 1835 schreibt Heinrich Wilhelm Dove in seinem Buch *Über Maass und Messen*: „Die Wahrscheinlichkeit der aus vielen Beobachtungen abzuleitenden Bestimmungen muss daher das Resultat einer Rechnung sein, welche lehrt, aus lauter unrichtigen Beobachtungen, nicht das richtige Resultat abzuleiten, denn dies ist unmöglich, sondern eins, welches wahrscheinlicher ist, als eine einzelne Beobachtung. Die Beobachtungskunst verdankt ihre hohe Vollendung in neuerer Zeit vielleicht eben so sehr der Entwicklung der sich auf sie beziehenden mathematischen Methoden, als der technischen Vervollkommnung der Beobachtungsmittel“ (Dove 1935: 166). Die Geschicklichkeit des Experimentators wird durch die theoretischen und mathematischen Kenntnisse erweitert, wenn nicht sogar abgelöst, denn Messfehler lassen sich mithilfe der Mathematik im Voraus berechnen und der Versuchsaufbau exakt planen. Fehlertheorie und Kontrollmessungen – Messungen unter Beibehaltung des Versuchsaufbaus bei variierenden Experimentalbedingungen – werden zu grundlegenden Bestandteilen des Messexperiments. Was Gauß 1832 mit seinen magnetischen Messungen vorexerzierte, wird Mitte des 19. Jahrhunderts zur beherrschenden Forschungslogik der experimentellen Naturwissenschaften. Diese neue Weise des Experimentierens birgt jedoch die Gefahr in sich, den Zufall als Möglichkeit neuer Entdeckungen zu eliminieren. Zum einen lassen sich Variationen als wahrscheinliche Beobachtungsfehler deklarieren und nicht als Hinweise auf bislang unbe-

39 Rudolf Stichweh beschreibt in seiner Studie *Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen: Physik in Deutschland 1740 – 1890* den Prozess der Mathematisierung der Physik, der im hypothetisch-deduktiven Forschungsstil gipfelt, als Folge institutioneller Entwicklungen in der Physik und Mathematik in Deutschland (vgl. Stichweh 1984; Hempel, Oppenheim 1948).

kannte Effekte. Zum anderen führt die Planung und Vorausberechnung der Experimente mehr oder weniger zu den erwarteten Resultaten.⁴⁰

Mit Experimenten rechnen

Die Möglichkeit, Beobachtungen aus Theorien zu prognostizieren und anhand von Messexperimenten zu verifizieren, lässt sich nur für einige Wissenschaftsbereiche und insbesondere nur für einfache Phänomene erfolgreich anwenden. Für komplexe Vorgänge ist es wesentlich schwieriger, Prognosen abzuleiten. Entweder weil es keine allgemeine Theorie dafür gibt und man nur empirische Gesetze mit beschränkter Reichweite kennt. Oder weil die mathematischen Gleichungen der allgemeinen Theorie zu komplex sind und sich aus ihnen keine mathematischen Lösungen und damit quantitative Prognosen analytisch deduzieren lassen. Die Folge ist eine Spaltung in theoretische Forschung und experimentelle Anwendungsforschung wie sie für zahlreiche Bereiche der Physik des 19. Jahrhunderts charakteristisch ist. Die wachsende Bedeutung technischer Entwicklungen in dieser Zeit verstärkte diese Kluft zunehmend. Ein typisches Beispiel für diese Situation ist die Strömungsdynamik. „More than a hundred years after Beroulli’s and Euler’s work, hydrodynamics and hydraulics were certainly no longer regarded as synonymous designations for a common science. Hydrodynamics had turned into a subject matter for mathematicians and theoretical physicists – hydraulics became technology. Aerodynamics, too, became divorced from its theoretical foundations in hydrodynamics. [...] In all these areas of application, air resistance was the central problem. Aerodynamic theory could not provide a single formula that accounted for the various practical goals. Therefore, empirical formulae derived from experimental investigations were introduced for each special area“ (Eckert 2006: 25, 26). Das Scheitern der theoretischen Strömungsdynamik, die empirischen Gesetze zu generalisieren, gründete in deren stark idealisierten Modellen. Diese mathematischen Modelle beschrieben das Verhalten idealer Fluide und vernachlässigten dabei die Dichteänderungen, die Reibung sowie die Bildung von Wirbeln. Die grundlegende Bewegungsgleichung für idealisierte Strömungsprozesse wurde 1755 von Leonhard Euler in seiner Schrift *Principes généraux du mouvement des fluides* formuliert. Sie basiert auf Newtons zweitem Axiom $F = dp/dt$, das den Einfluss von

40 Phänomennahe Experimente, die weniger auf Messung, denn auf unerwartete Effekte und Phänomene ausgerichtet sind, bleiben daher weiterhin Bestandteil der Experimentalkultur. Beide Experimentalstile prägen die moderne Physik wie auch andere naturwissenschaftliche Disziplinen.

Kräften (F) auf die zeitliche Veränderung (dr) von Impulsen (dp als Produkt von Masse m und Geschwindigkeit v) beschreibt. Die so genannte Euler-Gleichung formuliert die Bewegung reibungsfreier Fluide in Form eines partiellen Differentialgleichungssystems erster Ordnung. Doch mit dieser Gleichung für ideale Gase sind nur wenige praktische Probleme darstellbar. Daher fügte Claude M. Navier 1822 einen weiteren Term hinzu, der Eulers Gleichung in eine Beschreibung für viskose Fluide überführte. Viskosität ist die innere Reibung eines Fluids, die von dünn- bis zähflüssig reichen kann, und als Stoffkenngröße eine wichtige Rolle spielt.⁴¹

Unabhängig von Navier formulierte George G. Stokes 1845 in seiner Abhandlung *On the theories of the internal friction of fluids in motion* die Viskosität als ‚tangential force‘, wie in Abbildung 5 dargestellt. „In reflecting on the principles according to which the motion of a fluid ought to be calculated when account is taken of the tangential force, and consequently the pressure not supposed the same in all directions, I was led to construct the theory [...] which consists of equations (13), and of the principles on which they are formed“ (Stokes 1885: 76). „These equations [13] are applicable to the determination of the motion of water pipes and canals, to the calculation of the effect of friction on the motions of tides and waves, and such questions“ (Stokes 1845: 93).⁴² In seinem *Report on recent researches in hydrodynamics* präsentierte Stokes 1846 auf dem Treffen der British Association in Cambridge seine entscheidenden Ideen, die zur Navier-Stokes-Gleichung als der grundlegenden Gleichung der Strömungsmechanik bis heute führte.

„M. Navier was, I believe, the first to give equations for the motion of fluids without supposing the pressure equal in all directions. His theory is contained in a memoir read before the French Academy in 1822. He considers the case of a homogeneous incompressible fluid. He supposes such a fluid to be made up of ultimate molecules, acting on each other by forces which, when the molecules are at rest, are functions simply of the distance, but which, when the molecules recede from, or approach to each other, are modified by these circumstances, so that two molecules repel on each other less strongly when they are receding, and more strongly when they are approaching, that they do when

41 Beispielsweise ist die Viskosität von Wasser 1,002, die von Quecksilber 1,55 und die von Glycerin 1480,0. Die zweite Stoffkenngröße ist die Dichte. In der Regel geht man von räumlich und zeitlich konstanter Dichte eines Fluids aus.

42 „I afterwards found that Poisson had written a memoir on the same subject, and on referring to it I found that he had arrived at the same equations. The method which he employed was however so different from mine that I feel justified in laying the latter before this Society“ (Stokes 1885: 77).

they are at rest“ (Stokes 1846: 182). „In a paper read last year before the Cambridge Philosophical Society, I have arrived at the equations of motion in a different manner. The method employed in this paper does not necessarily require the consideration of ultimate molecules. Its principle feature consists in eliminating from the relative motion of the fluid about any particular point the relative motion which corresponds to a certain motion of rotation, and examining the nature of the relative motion which remains. The equations finally adopt in the case of a homogeneous incompressible fluid, and of an elastic fluid in which the change of density is small, agree with those of Poisson“ (Stokes 1846: 184, 185).

$$\rho \left(\frac{Du}{Dt} - X \right) + \frac{dp}{dx} - \mu \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right) = 0, \text{ \&c... (13),}$$

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0.$$

Abbildung 5: Bewegungsgleichung unter Berücksichtigung der Viskosität μ (Stokes 1845: 93)⁴³

Die Navier-Stokes-Gleichung beschreibt in Form einer nichtlinearen partiellen Differentialgleichung zweiter Ordnung die Änderung des Betrags und der Richtung der Geschwindigkeit eines Fluidelements gewisser Masse in Abhängigkeit von den einwirkenden Kräften wie Druck, Schwerkraft und Viskosität. Charakteristisch für die Ablenkung eines Fluids ist seine Trägheit, die von seiner Dichte bestimmt ist.⁴⁴ Die Komplexität dieser Gleichung hat jedoch zur Folge, dass sie nur für seltene Fälle analytisch zu lösen ist. „Könnte man diese Gleichungen allgemein analytisch lösen, so ergäben sich ungeahnte Einblicke in die Natur von Strömungen und Turbulenzen; man würde vieles verstehen, was uns heute noch rätselhaft ist. Hier stehen wir vor einer Situation, in der die Unzulänglichkeit mathematischer Methoden den physikalischen Fort-

43 „Let us now consider in what case it is allowable to suppose μ to be independent of the pressure. It has been concluded by Dubuat, from his experiments on the motion of water in pipes and canals, that the total retardation of the velocity due to friction is not increased by increasing pressure. The total retardation depends, partly on the friction of the water against the sides of the pipe or canal, and partly on the mutual friction, or tangential action, of the different portions of the water. Now if these two parts of the whole retardation were separately variable with p , it is very unlikely that they should when combined give a result independent of p . The amount of internal friction of the water depends on the value of μ . I shall therefore suppose that for water, and by analogy for other incompressible fluids, μ is independent of the pressure“ (Stokes 1885: 92, 93).

44 Die Volumenkraft eines inkompressiblen, elektromagnetisch neutralen und makroskopischen Fluids wird durch die SI-Einheit $\text{N/m}^3 = \text{kg s}^{-2} \text{m}^{-2}$ dargestellt.

schritt ernsthaft behindert“ (Bergmann 1998: 478, 479). Da eine allgemeine Lösung der Navier-Stokes-Gleichung nicht zu erwarten war – und bis heute auch nicht zu erwarten ist – musste sich die Physik mit numerischen Berechnungen der Gleichung für spezifische Rand- und Anfangsbedingungen, mit idealisierten Modellen oder mit experimentellen Resultate begnügen. Beispielsweise beschreibt Stokes Law den speziellen Fall des Widerstandes einer Kugel in einer Flüssigkeit mit konstanter Fließgeschwindigkeit. Die Idealisierung des Reibungswiderstandes vernachlässigt jedoch die Bildung von Wirbeln, ein wichtiges Phänomen jeder Strömung. Verwirbelungen konnten nur auf Phänomenebene beobachtet, aber nicht mathematisch beschrieben werden. Einer der erfolgreichsten Experimentatoren in diesem Gebiet, Osborn Reynolds, konstatierte: „Now the reason why mathematicians have thus been baffled by the internal motions of fluids appears to be very simple. Of the internal motions of water or air we can see nothing. On drawing the disc through the water there is no evidence of the water being in a motion at all, so that those who have tried to explain these results have had no clue; they have had not only to determine the degree and direction of the motion, but also its character“ (Reynolds 1877: 185).

Mithilfe von Rauch, dem Einspritzen einer farbigen Flüssigkeit in einen Wassertank oder mit Seifenblasen machte man in aufwendigen Experimenten das Verhalten turbulenter Strömungen sichtbar und analysierbar. In den Proceedings der Philosophical Society of Manchester vom Februar 1877 werden die Experimente von Reynolds beschrieben: „Professor Osborn Reynolds exhibited various forms of vortex motion in a large glass tank by means of colour, or bubbles of air, the vortex lines behind an oblique vane, the vortex ring behind a circular disc, the vortex rings caused by raindrops, and the vortex rings caused by a puff of water. The various ways in which these vortices move were also shown“ (Reynolds 1877a: 183). Reynolds gelang es mit diesen Experimenten den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung aufzuklären. Durch das Studium der Größen der Navier-Stokes-Gleichung konnte er eine dimensionslose Verhältniszahl, die so genannte Reynoldszahl, ableiten. Diese Zahl gibt das Verhältnis zwischen kinetischer Energie und Reibungsenergie an und charakterisiert den Zustand einer Strömung: Mit zunehmender Reynoldszahl überwiegt der Anteil der kinetischen Energie. Ab einer Reynoldszahl von 10^3 verhält sich die Strömung, abhängig von den Randbedingungen, turbulent. Für eine unendlich große Reynoldszahl geht die Navier-Stokes-Gleichung in die Euler-Gleichung für idealisierte Fluide

ohne Reibung über, die Viskosität spielt keine Rolle mehr.⁴⁵ Trotz dieser Erfolge gibt es bis heute keine hinreichende Theorie der Turbulenz und man behilft sich mit unterschiedlichen Turbulenzmodellen.⁴⁶ Die zunehmende Bedeutung technischer Entwicklungen und das Problem der Turbulenz vergrößerte die Spaltung zwischen Theorie und experimenteller Forschung. In einem Lehrbuch für Flugzeugbau von 1929 heißt es:

„A broad discussion of the motion of air under the influence of friction is of little real use. We discuss as briefly as possible a few terms often found and enter into the practical part of the theory, - the model rules. The simple model rules are only approximations, but as such they are of immense practical use, and they refer to all kinds of flow, not only to theoretical ones. They are used by employing coefficients of the air forces, assumed to be constant. The model rules that include friction deal with the variations of these coefficients. They occur chiefly in connection with the interpretation of model tests, a subject of great practical importance. [...] Our knowledge of the surface air friction is wholly based on experience, but the model rules suggest a convenient formula for its magnitude“ (Munk 1929: 137).

Wissenschaft und Technik fanden sich in der Zwickmühle zwischen Idealisierung und Komplexität, zwischen Stagnation der Analytik und dem Mangel an Rechenkraft gefangen. Die Anwendungsforscher waren gezwungen, das Dilemma durch experimentell gewonnene Gleichungen und Koeffizienten zu überbrücken. Sie mussten mit Experimenten rechnen, wollten sie neue und dringend benötigte Erkenntnisse gewinnen, auch wenn diese nur eine eingeschränkte Reichweite besaßen. „In 1896 a textbook on ballistics lists in chronological order 20 different ‚laws of air resistance,‘ each one further divided into various formulae for different ranges of velocity. [...] No physical theory could provide a logical framework for justifying these empirical ‚laws‘“ (Eckert 2006: 26). Der Nachteil dieser spezifischen Gleichungen in Form empirischer, also analoger Berechnungen lag in ihrer Beschränkung auf die analysierten Fall-

45 Beispielsweise hat ein Flugzeugrumpf eines modernen Passagierflugzeugs bei einer Geschwindigkeit von 300 m/s eine Reynoldszahl von 109. Eine Schnecke hingegen kommt auf $Re = 2$ und verursacht kaum Turbulenzen.

46 „Die Schließungsannahmen zur Beschreibung der Reynoldsschen Spannungen werden als ‚Turbulenzmodell‘ bezeichnet, die nach empirischen Annahmen in Hierarchien gegliedert sind. Man unterscheidet algebraische Modelle, die eine turbulente Zähigkeit beschreiben, Eingleichungsmodelle, in denen die Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie gelöst wird, Zweigleichungsmodelle, die die Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie und eine zum Teil mit empirischen Ansätzen entwickelte Differentialgleichung zur Beschreibung der turbulenten Dissipationsrate (k- ϵ -Modell) beinhalten“ (Hoßfeld 1996: 20).

studien. Sie gaben keinen mathematisch verallgemeinerten Einblick in die grundlegenden Probleme der Strömungsdynamik. „The practical importance of such questions as those above mentioned [magnitude and form of an aqueduct] has made them the object of numerous experiments, from which empirical formulae have been constructed. But such formulae, although fulfilling well enough the purposes for which they were constructed, can hardly be considered as affording us any material insight into the laws of nature; nor will they enable us to pass from consideration of the phenomena from which they were derived to that of others of a different class, although depending on the same causes“ (Stokes 1845: 76).

Zur Bestimmung der empirischen Gleichungen und ihrer Reichweite wurden immer aufwendigere Experimente durchgeführt. Ab Ende des 19. Jahrhunderts kamen Windkanäle in Gebrauch, um numerische Informationen unter variierenden Bedingungen zu gewinnen. Mangels theoretisch anwendbarer Ansätze und mangels Rechenkapazitäten wurden Windkanäle als Analogrechner benutzt. Dafür wurden neue Messinstrumente entwickelt. Beispielsweise benutzten Forscher an der Universität Delft in den 1920er Jahren Modelle aus Draht, um die Windgeschwindigkeit an deren Oberfläche im Windkanal zu messen. Dabei machten sie sich das Prinzip zunutze, dass der elektrische Widerstand des Drahtes von dessen Temperatur abhängt. Die Abkühlung durch den Luftstrom gibt indirekt Aufschluss über die Windgeschwindigkeiten. „The velocity of the air stream, therefore, can be electronically monitored by accounting for the ensuing changes in electrical resistance. This method has already been described before the First World War, but only with the use of extremely thin wires (with a diameter of approximately 0.015 mm) and sophisticated electronic circuits did it become feasible for measurements of velocity fluctuations“ (Eckert 2006: 109). Doch auch wenn diese empirischen Ergebnisse für die praktischen Anwendungen unverzichtbar waren, die numerische Darstellung auf Basis physikalischer Größen war ungenau. „The validity of such estimates is at any rate limited by the wide variety of existing analog devices, which use a great number of different mechanical, elastic, and electrical methods of expressing and of combining quantities as well as mixtures of these, together with most known methods of mechanical, electrical and photo electrical control and amplification. Moreover, all analogy machines have a marked tendency towards specialized, one-purpose characters“ (Goldstine, von Neumann 1946: 9).⁴⁷

47 Eine einfache Weise die Ableitung einer Funktion analog zu berechnen ist die Verwendung von Elektrizität. „If the form of a varying current through a pure inductance represents a function, the voltage across the inductance

Beispielsweise erzeugten die ersten Windtunnel keine gleichförmig strömenden Luftmassen, sondern turbulente Ströme. Solange es sich um kleine Testmodelle oder langsame Strömungsgeschwindigkeiten handelte, konnten die Effekte der turbinenerzeugten Turbulenzen vernachlässigt werden. Doch mit höheren Geschwindigkeiten und größeren Modellen wirkte sich die Konstruktion der Windtunnel auf die Resultate aus. Die Frage, wie zuverlässig die gewonnenen Daten für die Ableitung empirischer Gleichungen waren, wurde daher zu Beginn der 1920er Jahre laut. In einem Bericht des US-amerikanischen NACA National Advisory Committee for Aeronautics von 1925 hieß es: „The data collected here [Langley Laboratory] must be considered, primarily, as data concerning the tunnel, and not the models tested here“ (Reid 1925: 219). Zudem war es nicht möglich, die Ströme der verschiedenen Windtunnel zu standardisieren, d.h. dasselbe Modell erzeugte in verschiedenen Tunneln unterschiedliche Ergebnisse. Die Ironie dabei war, dass das zu untersuchende Phänomen, die Turbulenz verursacht durch die Testmodelle, als Turbulenz des erzeugten Windstromes zum Problem der Experimentaleinrichtung wurde. Da es immer noch an einer allgemeinen Theorie der Turbulenz fehlte, waren die Forscher gezwungen, ihre Windtunnel auf Basis empirischer Versuche zu verbessern und die Experimente trotz allem zum Rechnen zu nutzen. Denn der Zweck dieser Experimente war es nicht, theoretische Annahmen zu verifizieren, sondern „to replace a computation from an unquestioned theory by direct measurement. Thus wind tunnels are, for example, used at present, at least in large parts, as computing devices of the so-called analogy type [...] to integrate the non-linear partial differential equations of fluid dynamics“ (Goldstine, von Neumann 1946: 4).

Doch in den 1940er Jahren begann sich ein neuer Weg abzuzeichnen. „It seems clear, however, that digital wind (in the Wiener – Caldwell terminology: counting) devices have more flexibility and more accuracy, and could be made much faster under present conditions. We believe, therefore,“ schreibt John von Neumann – Computerpionier wie Erfinder der Computersimulation – 1946 in seinem grundlegenden Bericht *On the Principles of large Scale Computing Machines*, „that it is now time to concentrate on effecting transition to such devices, and that this will increase the power of the approach in question to an unprecedented extent“ (Goldstine, von Neumann 1946: 4). Die Resultate der Computerexperimente, so hoffte er, sollten wesentlich akkurater und problemlos

represents the derivative. Unfortunately it is not easy either to cause a current to vary precisely in a prescribed manner, nor to measure precisely a varying voltage. [...] None of these applications require the precision desirable in mathematical instruments“ (Bush 1936: 657).

miteinander vergleichbar sein. Damit sollte nicht nur in der Strömungsdynamik ein Meilenstein gesetzt werden. „Das Schisma zwischen der Ingenieurhydraulik und der theoretischen Hydrodynamik der Physiker (,Tabellenkunde gegen realitätsferne Theorie’) wurde lange nicht überwunden. [...] Erst die numerische Simulation eröffnete die Möglichkeit, die Hydrodynamik realer Fluide auch praktisch anzuwenden“ (Malcherek 2001: 37). Die Idee, nicht mit Experimenten zu rechnen, sondern mit Rechnern zu experimentieren hat ihren Ursprung in dem Schisma von Theorie und Anwendung, das für viele Bereiche der Natur- und Technikwissenschaften zu Beginn des 20. Jahrhunderts kennzeichnend war. Die Entwicklung automatischer Rechenmaschinen geht auf die Notwendigkeit numerischer Simulationen zurück und diese treiben bis heute die Entwicklung der Supercomputer an.

John von Neumanns digitaler Windkanal

Zu Beginn der computerbasierten Simulation taucht ein Name wiederholt auf: John von Neumann, ein ungarischer Mathematiker, der 1929 in die Vereinigten Staaten emigrierte. Von Neuman war während des Zweiten Weltkrieges in das Manhattan-Projekt involviert, er publizierte 1944 zusammen mit Oskar Morgenstern *The Theory of Games and Economic Behavior*, er entwarf die grundlegende Architektur moderner Computer und er entwickelte eine Methode, um Differentialgleichungen auf Computern zu berechnen. Aus seiner Feder stammten maßgebliche Beiträge zur Quantenmechanik, zur Mengenlehre und zur Statistik. Von Anfang an war sich von Neumann über die Bedeutung automatischer Rechenmaschinen für Wissenschaft und Technik bewusst und er forcierte daher in den 1940er Jahren die Entwicklung von Rechnern wie ENIAC Electronic Numerical Integrator and Calculator, EDVAC Electronic Discrete Variable Computer und NORC Naval Ordnance Research Calculator. Herman Goldstine, Offizier der U.S. Army und Koordinator des ENIAC Projekts, nannte John von Neumann den Doyen der Computerentwicklung wie auch der numerischen Simulation. Goldstine hatte von Neumann 1943 in Los Alamos kennen gelernt. Von Neumann war dort für die Berechnung von partiellen Differentialgleichungen kugelförmiger Explosionswellen zuständig, die zu komplex waren, um sie algebraisch lösen zu können. In Los Alamos entwickelte er sich zu einem der ersten Experten in der numerischen Simulation komplexer Differentialgleichungen, damals allerdings noch als Berechnungen per Hand. „The blackboard was filled with very complicated equations that you could encounter in other forms in other offices,“ beschrieb Stanislaw Ulam die Situation 1943 in Los Ala-

mos. „This sight scared me out of my wits: looking at these I felt that I should never be able to contribute even an epsilon to the solution of any of them. But during the following days, to my relief, I saw that the same equations remained on the blackboard. I noticed that one did not have to produce immediate solutions. [...] Little as I already knew about partial differential equations or integral equations, I could feel at once that there was no hope of solution by analytical work that could yield practical answers to the problems that appeared“ (Ulam 1980: 95).

Im selben Jahr, 1943, begann eine Gruppe von Wissenschaftlern und Ingenieuren an der Moore School of Engineering der Universität von Pennsylvania den Rechner ENIAC zu entwickeln. Herman Goldstine war der verantwortliche Koordinator seitens der U.S. Army, J. Presper Eckert der Chefsingenieur, John Mauchly sein Assistent und J.G. Brainerd der Projektmanager. „The ENIAC was an electronic calculator that inaugurated the era of digital computing in the United States. Its purpose was to calculate firing tables for the U.S. Army, a task that involved the repetitive solution of complex mathematical expressions“ (Ceruzzi 1998: 15). Ziel war es, einen elektronischen Computer zu bauen, der auf Basis einfachster Rechenregeln komplexere Funktionen für die Lösung von Differentialgleichungen ausführen sollte. „The arithmetic design of ENIAC was influenced mainly by two kinds of calculators: mechanical desk calculators, electrically powered and hand operated; and electromechanical card operated IBM machines“ (Burks 1980: 315). ENIAC war für seine Zeit ein unglaublich schneller Computer, basierend auf 18.000 Vakuumröhren, dessen Leistungsfähigkeit jedoch durch mangelnde Speicherkapazitäten limitiert wurde.⁴⁸ Nur zwanzig Dezimalzahlen konnten im Computer abgespeichert werden. Zwischen- und Endresultate mussten auf Lochkarten gestanzt werden und das Programm wurde durch Steckverbindungen manuell für jedes Programm aufs Neue ausgeführt. Das manuelle Programmieren und das Stanzen der Lochkarten verlangsamte ENIAC erheblich und inspirierte von Neumann, der 1944 von Goldstine als Experte für das Lösen von Differentialgleichungen in das ENIAC Team geholt worden

48 „John [Mauchly] and Pres [Eckerts] proposed to achieve this very high computing speed by operating vacuum-tube circuits at 100,000 pulses/sec. [...] The first development task on the ENIAC project was to design reliable counters that worked at 100,000 pulses/sec and to show by test that switching circuits could work at a comparable speed. The final ENIAC operated at 100,000 pulses/sec and this became the first computer to exploit fully the vacuum-tube technology of the time“ (Burks, 1980: 314). J. Presper Eckert und John W. Mauchly verließen 1946 das ENIAC Team, um die Eckert-Mauchly Computer Corporation zu gründen und UNIVAC Universal Automatic Computer zu bauen.

war, zu der Idee, Programme und Daten im selben Speicher abzuspeichern. In einem Bericht von 1945 an die U.S. Army, *First Draft of a Report on the EDVAC*, schlug von Neumann deshalb mit EDVAC ein Nachfolgemodell für ENIAC vor. Neben zahlreichen Verbesserungen sollte EDVAC einen umfangreichen Speicher für Programme wie Daten erhalten, die so genannte von-Neumann-Architektur. Arthur W. Burks, Herman H. Goldstine und John von Neumann beschrieben später das neue Design detailliert in dem Artikel *Preliminary Discussions of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument*, der seither als einer der wegweisenden Publikationen der Computerentwicklung gilt (vgl. Burks, Goldstine, von Neumann 1946).

John von Neumanns Motivation automatische Rechner zu bauen, lag in der Überwindung der Begrenzung der analytischen Methode bei der Lösung nicht-linearer Differentialgleichungen. Um Computer jedoch experimentell nutzen zu können, beispielsweise als digitalen Windkanal, bedarf es einer Mathematik, die an die Arbeitsweise der Computer angepasst ist. Denn die Berechnungen der Gleichungen müssen in Einzelschritte zerlegt werden, damit der Computer sie schrittweise ausführen kann. Diese Form der Mathematik existierte bis in die 1940er Jahre nur rudimentär. Zwar gab es Erfahrungen für die arbeitsteilige Berechnung einfacher Gleichungen, seit Berechnungen in größerem Umfang an menschliche Computer delegiert wurden. David A. Grier beschreibt in seinem Buch *When Computers were human* die Geschichte dieser zunehmenden Arbeitsteilung sowie ihrer praktischen Anforderungen, beispielsweise in der Astronomie.

„[Andrew] Crommlin, with the assistance of an observatory colleague, Phil Crowell (1879 – 1949), identified the basic differential equations that described the path of the comet and created a computing plan for the Greenwich Observatory computing staff. The computing plan had certain similarities to the plan that Clairaut had used in 1757. It located all the key objects in space and described the forces acting between them. At each step of the calculation, the computers advanced the comet, Saturn, Jupiter, and the other planets forward by a small distance. They did not worry about elliptical orbits but instead followed the direction of the forces. Once they had moved the objects, they had to recalculate all the forces. It was a slow and methodological process, one that required much grinding of Brunsvigas and other calculating machines“ (Grier 2005: 121).

Doch die Methoden, die gebraucht wurden, um umfangreiche Berechnungen an einen automatischen Rechner zu delegieren, stellten eine weitaus größere Herausforderung dar als die ‚computing plans‘, die vor Erfindung der Computer entworfen und ausgeführt wurden. Denn es ging nicht nur um ausgefeilte Berechnungspläne in Form maschinentauglicher Algo-

rithmen, die angaben, wie die Berechnungen schrittweise auszuführen seien oder wie Daten abgerufen und gespeichert werden. Es ging um neue Methoden einer diskreten und an Maschinen delegierbaren Mathematik.

Im Falle von Differentialgleichungen, die das Verhalten von Systemen in einem Raum-Zeit-Kontinuum beschreiben, bedeutet dies, dass Menschen oder Computer, je nach Leistungskapazität, nur einige wenige Raum-Zeit-Punkte näherungsweise berechnen können. Ende der 1940er Jahre entwickelte von Neumann die Differenzenmethode für den Computer weiter. Diese Methode ersetzt die Differentiale der Differentialgleichungen durch Differenzenquotienten und wurde erstmals 1759 von Joseph-Luis Lagrange verwendet. Dadurch werden die Gleichungen für ein Gitter an Berechnungspunkten berechenbar.⁴⁹ Durch die schiere Rechengewalt erhoffte sich von Neumann wissenschaftliche Durchbrüche, die durch die Stagnation der analytischen Methode bisher unerreichbar waren. Noch in Los Alamos schrieb er bezüglich der numerischen Simulation von Wellengleichungen: „The solution of hyperbolic equations with more than two independent variables would afford a great advance to fluid dynamics since most problems there involve two or three spatial variables and time, i.e. three or four independent variables. In fact the possibility of handling hyperbolic systems in four independent variables would very nearly constitute the final step in mastering the computational problems of hydrodynamic“ (Goldstine, von Neumann 1946: 12).

Obwohl diese Prognose zu optimistisch war,⁵⁰ zeichnete sie den Weg vor, den die computerbasierte Simulation in den folgenden Jahren und Jahrzehnten nehmen sollte. Rechengeschwindigkeit wurde dabei zum entscheidenden Kriterium der neuen Simulationswissenschaften und ist es bis heute.⁵¹ Denn um beispielsweise die möglichen Kurvenbahnen der

49 „In fact, in an early paper (1759) we see him [Lagrange] solving linear difference equations with constant coefficients with the help of the so-called characteristic equation“ (Goldstine 1977: 145). Später wurde die Differenzenmethode von den Human Computing Laboratories zur Berechnung verschiedenster Tabellen benutzt. Beispielsweise organisierte Gertrude Blanch 1941 „a series of eight mathematics courses. [...] The final course presented the methods of the planning committee: matrix calculations, the theory of differences, and special functions“ (Grier 2005: 259).

50 „The intrinsic difficulties of science have delayed the attainment of the goal. The coupling between very short and very long length scales within a single problem, and the proliferation of degrees of freedom are examples typical of these difficulties. Their importance was not fully appreciated by von Neumann“ (Glimm 1990: 186).

51 Bereits die Rechengewalt dieser ersten elektronischen Computer war überzeugend im Kampf gegen die Begrenzungen der analytischen Mathematik. Gleichwohl ließ die Kritik an dieser Art, Mathematik zu betreiben, nicht lange auf sich warten. Bereits zu Beginn der 1940er Jahre in Los

Masseteilchen (Trajektorien) entsprechend der Wellengleichungen im dreidimensionalen Raum näherungsweise berechnen zu können, bedarf es unzähliger Rechenoperationen, wie in Abbildung 6 dargestellt und von John von Neumann und Herman Goldstine vorgerechnet: „For such problems the number of multiplications rises enormously due to the number of lattice points. It is not unreasonable to consider between 10^6 and 5×10^6 multiplications for a 3-variable problem and between 2.5×10^7 and 2.5×10^8 multiplications for a 4-dimensional situation. Hence these are roughly equivalent to 1,300 to 6,700 trajectories and to 33,000 to 330,000 trajectories“ (Goldstine, von Neumann 1946: 12). Erfahrenes Rechenpersonal benötigte per Hand sieben Personenstunden, um die 750 Operationen für die Berechnung einer einzigen Trajektorie auszuführen. Der Differential Analyzer, ein mechanischer Analogrechner, der zwischen 1928 und 1932 von Vannevar Bush am MIT Massachusetts Institute of Technology gebaut und betrieben wurde, benötigte zehn bis zwanzig Minuten für dieselbe Berechnung (vgl. Bush 1931, 1936). ENIAC konnte die 750 Operationen in 2,25 Sekunden ausführen.

Computer	1 Trajektorie = 750 Operationen	3D (Ebene/Zeit) Ø 4.000 Traj. = 3 Mio. Op.	4D (Raum/Zeit) Ø 165.000 Traj. = 124 Mio. Op.
Per Hand	7 std.	3,2 Jahre	131,8 Jahre
Analogrechner Dif. Analyzer 1932	15 min.	41,5 Tage	4,7 Jahre
Digitalrechner ENIAC 1946	2,25 sec.	2,5 std.	4,3 Tage
Parallelrechner BlueGene/L 2007	1,5 piko sec.	6 nano sec.	0,25 mikro sec.

Abbildung 6: Entwicklung der Rechengeschwindigkeit am Beispiel der Berechnungen nach John von Neumann 1948 (Gramelsberger 2008)

Eine diskrete und an Maschinen delegierbare Mathematik geht jedoch mit dem basalen Konzept der Neuzeit – dem Prinzip der Stetigkeit wie

Alamos, als man die numerischen Berechnungen per Hand anstelle der analytischen Theorie vorantrieb, zeigte sich die Spaltung zwischen Numerikern und Analytikern. Stanislaw Ulam, ein Kollege von John von Neumann in Los Alamos, stellte fest: „Proceeding by ‚brute force‘ is considered by some to be more lowbrow“ (Ulam 1980: 94). Nichtsdestotrotz ging man im ENIAC-Team davon aus, dass die Praktikabilität und Kosteneffizienz schneller automatischer Rechner entscheidende Kriterien der zukünftigen Entwicklung von Wissenschaft und Technik seien.

Felix Klein es 1895 genannt hatte – anders um, als die analytische Methode. Denn grundsätzlich stellt die numerische Simulation eine Approximation dar. Es lässt sich nicht immer beweisen, dass die numerische Simulation einer Gleichung sich der exakten, aber unbekannten Lösung stetig annähert oder ob überhaupt eine Lösung existiert.⁵² Ob die berechneten Punkte der exakten und kontinuierlichen Lösung tatsächlich nahe kommen, ist nicht einfach zu entscheiden. Daher erhalten praktische Kriterien wie die Stabilität der Lösung eine grundlegende Bedeutung. „Der Laxsche Äquivalenzsatz sagt aus, daß der Nachweis der numerischen Stabilität die notwendige und hinreichende Bedingung für die Konvergenz der Lösung darstellt, wenn die Differenzenapproximation konsistent formuliert ist. Unter einer konsistenten Formulierung versteht man, daß die Differenzenapproximation wieder in die zu approximierende Differentialgleichung übergeht, wenn die Abstände der Gitterpunkte gegen Null streben. Eine Differenzenapproximation wird numerisch stabil genannt, wenn bei der Auflösung der resultierenden Differenzengleichungen Abbruch-, Rundungs- und Verfahrensfehler nicht beliebig anwachsen“ (Krause 1996: 15).⁵³ Verhält sich die Lösung nicht stabil, ist sie entweder falsch oder man hat es mit einer mehrdeutigen Lösung zu tun. Bei der Diskretisierung, also der Umwandlung einer Differential- in eine Differenzengleichung, gilt es, Stabilitätskriterien zu befolgen, damit die berechneten Näherungswerte aussagekräftig sind. Dazu müssen die zeitlichen und räumlichen Auflösungen der Berechnungen aufeinander abgestimmt sein. 1947 beschrieb von Neumann diese Erkenntnis in dem Bericht *On the Numerical Solution of Partial Differential Equations of Parabolic Type*.

„A method is described for solution of parabolic differential equations by calculating routines involving stepwise integration of both variables. The main features of the method arise from manipulation introduced to avoid instabilities that generally appear when partial differential equations are converted into difference equations“ (von Neumann, Richtmyer 1947: 652). „The difference equations may be unstable, that is, under some circumstances irregularities

52 Beispielsweise deutet „alles darauf hin, daß die Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen echt mehrdeutig sind. Die Gründe dafür werden derzeit im Rahmen der Nichtlinearen Dynamik und Chaostheorie erforscht“ (Malcharek 2001: 51).

53 Stabilität bedeutet, dass ein numerisches Verfahren gegenüber kleinen Änderungen der Daten (Eingabedaten wie auch Rundungsfehlern) unempfindlich ist. Weitere Kriterien sind die Kondition und die Konsistenz eines numerischen Verfahrens. Die Kondition beschreibt die Abhängigkeit der Lösung von den Eingabedaten, die Konsistenz bedeutet, dass das numerische Verfahren tatsächlich das gegebene Problem löst und kein anderes.

may be amplified and grow without limit as time goes on; a solution of (2) [Differenzengleichung] does not in general approach a solution of (1) [Differentialgleichung] as the mesh is made finer and finer unless a certain restriction [...] is applied to the relation between Δ_y [Abstand der Berechnungspunkte] and Δ_t [zeitliche Auflösung] at each stage of the limiting process. [...] The condition for stability (condition that all disturbance get smaller as t increases) is clearly that the real part of α should be negative for all real β , or that the quantity $e^{\alpha \Delta t}$ [...] should be lie between -1 and +1. [...] if Δ_y is chosen *very small* in the interest of accuracy, Δ_t must be chosen *very very small* in the interest of stability“ (von Neumann, Richtmyer 1947: 653, 654).

Stabilitätsbedingungen sind bis heute für explizite Verfahren der numerischen Simulation von Differentialgleichungen zu befolgen.⁵⁴ Werden sie nicht berücksichtigt, verhält sich die Simulation instabil, da sich Fehler aufsummieren können. Damit laufen die Resultate ins Fiktive. Computerbasierte Berechnungen können verschiedenen Fehlerquellen unterliegen, wobei einige dieser Fehler unvermeidbar sind. Beispielsweise ergeben sich zwangsläufig Fehler durch die Ungenauigkeiten der Eingabedaten. „Any uncertainty of all these inputs (data as well as equations) will reflect itself as an uncertainty (of the validity) of the results. [...] This type of error is absolutely attached to any mathematical approach to nature, and not particularly characteristic of the computational approach“ (Goldstine, von Neumann 1946: 16). Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Natur der Simulation selbst, da die Diskretisierung als Verfahren mathematisch nicht eindeutig ist. Unter Umständen kann die gewählte Differenzenapproximation zu falschen Lösungen führen. Schließlich ist zu beachten, „that no machine, no matter how it is constructed, is really carrying out the operations of arithmetic in the rigorous mathematical sense“ (Goldstine, von Neumann 1946: 16). Computer verwenden endliche Zahlen, die in ihrer Genauigkeit begrenzt sind. Rundungsfehler können sich daher auf die Berechnungen auswirken. Es bedarf daher der Untersuchung des Lösungsverhaltens simulierter Gleichungen anhand der durchgeführten Simulationsläufe. Hier zeigt sich aber auch der Erkenntnisgewinn von Computereperimenten, denn dieser liegt im Studium des Lösungsverhaltens komplett mathematisierter, diskretisierter und in Algorithmen formulierter Modelle. Dies ist eine relativ neue und durch die Effizienzsteigerung der Computer zunehmend die Naturwissenschaft dominierende Erkenntnisstrategie. Diese Ver-

54 Die explizite Methode nutzt für die Berechnung von t_{n+1} nur die Werte t_n . Die implizite Methode hingegen nutzt für die Berechnung für t_{n+1} die Werte t_n und t_{n+1} . Die Stabilitätsbedingungen sind nur für explizite Simulationsverfahren zu berücksichtigen. John von Neumann konzipierte auch ein implizites Verfahren (vgl. von Neumann, Richtmyer 1947).

wendungsweise des Computers, wie John von Neumann sie in den 1940er Jahren vorschlug, markierte den Beginn der Überwindung der Stagnation in der Analysis und setzte damit den Auftakt zur Nutzung von Computerexperimenten in den Wissenschaften.

„John von Neumann wollte den ‚digitalen Windkanal‘! Er erwartete, daß wirklich effiziente digitale Hochleistungsrechner den toten Punkt bei den rein analytischen Methoden zur Behandlung nichtlinearer Probleme überwinden und daß aus der derart numerisch erschlossenen Hydrodynamik die mathematische Durchdringung des Gebietes der nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen stimuliert werden könnte, indem sich aus den Computerresultaten jene heuristischen Fingerzeige ergäben, die von jeher in allen Bereichen der Wissenschaft den Schlüssel für entscheidende mathematische Ideen liefern könnten. In gewissem Sinne klingen seine damaligen Argumente jung und vertraut, denn die weltweit initiierten nationalen Förderprogramme des Höchstleistungsrechnens folgen dieser Zielsetzung, allerdings nicht nur mit dem Blick auf Strömungsprobleme, sondern auf der breiten Ebene der Computational Sciences & Engineering“ (Hoßfeld 1996: 4).

3 ENTSTEHUNG DER COMPUTATIONAL SCIENCES

Mit dem Erscheinen der elektronischen Computer und ihrer weltweiten Verbreitung verändert sich die wissenschaftliche Forschung wie auch Forschungslandschaft. Keine Disziplin und keine wissenschaftliche Methode bleiben von der Nutzung der Computer unberührt. Wissenschaftler und Ingenieure setzen den Computer als Forschungs-, Experimentier- und Prognoseinstrument in der täglichen Arbeit ein und Datenleitungen sorgen für eine globale Vernetzung der computerbasierten Forschung. Heute ist nahezu jedes naturwissenschaftliche Institut und Labor an ein Rechenzentrum angeschlossen, in jedem Messinstrument finden sich Computerchips und Theorie wird zunehmend in Algorithmen transformiert. Computer und Algorithmen verwandeln die Welt der Phänomene und Fakten in eine Parallelwelt aus PetaBytes von Daten. Ein so grundlegender Wandel des wissenschaftlichen Instrumentariums bleibt nicht ohne ebenso grundlegende Auswirkungen auf die Epistemik wie Praktik des Forschens. Dabei handelt es sich um nichts weniger, als die zweite Hälfte der wissenschaftlichen Revolution der Neuzeit.

„John von Neumann foresaw that the equations describing scientific phenomena, once expressed in mathematical terms, could be solved numerically, without recourse to routine or repetitive experiment. This vision is nothing less than the second half of the scientific revolution. Throughout four centuries we have expected that a successful scientific theory would have its major concepts expressed quantitatively as numbers and its major relationships expressed as mathematical equations; the truth of this theory was settled by experimental tests and hand calculations, often in idealized situations. The second half of the scientific revolution is no less sweeping in its goals. The solutions of the equations are also to be obtained on mathematical grounds, by numerical computation, without restriction to idealized cases“ (Glimm 1990: 185).

Mit Rechnern experimentieren

Ziel dieser Vollendung der wissenschaftlichen Revolution in Form der Computational Sciences ist zum einen die Substitution herkömmlicher Experimente durch Computereperimente, zum anderen die Konkretisierung der bis dahin stark idealisierten Modelle, sowohl bezüglich der prozessualen Komplexität als auch realitätsnahe Details. Mit Hilfe der Computer können realitätsnahe Modelle berechnet und ausgewertet werden. Der Erkenntnisgewinn liegt dabei in der Erforschung komplexer Wechselwirkungen anhand numerischer Studien des Lösungsverhaltens der simulierten Modelle. Triebfeder der Entwicklung ist die zunehmende Anwendbarkeit der Modelle, denn sowohl in den Ingenieurs- wie Naturwissenschaften genügt das rein qualitative Verständnis von Prozessen auf abstrakter Ebene nicht mehr, wie das Beispiel der Strömungsdynamik zeigte. Die so genannten ‚first principles‘ – mathematische Darstellungen naturwissenschaftlicher Gesetze wie Eulers Bewegungsgleichung basierend auf Newtons zweitem Axiom – sind zu stark idealisiert, als dass sie auf Anwendungskontexte übertragen werden könnten. Computereperimente bieten nun erstmals die Möglichkeit, die idealisierten Modelle mit empirischen Details anzureichern und in ihrem Verhalten zu erforschen. Die Folge ist die zunehmende Verknüpfung von qualitativ-theoretischem und quantitativ-empirischem Verstehen komplexer Prozesse als charakteristische Epistemik einer computerbasierten Wissenschaft. Diese Epistemik war bislang als Wechselspiel zwischen idealisierten Modellen und „numerous experiments, from which empirical formulae have been constructed“ (Stokes 1845: 76) realisiert. Mit dem Problem, dass „such formulae, although fulfilling well enough the purposes for which they were constructed, can hardly be considered as affording us any material insight into the laws of nature“ (Stokes 1845: 76). Diese Epistemik verknüpft sich nun im Computer zu einer neuen Form von Theorieexperimenten. Computereperimente sind eine Mischung aus Theorie basierend auf first principles, empirischen Annahmen und Heuristiken. Sie führen nicht nur ein neues Verhältnis zwischen bestehender Theorie, Experiment, Messung und Beobachtung ein, sie vereinen dieses neue Verhältnis in sich und implementieren es in ihrer charakteristischen Forschungslogik. Heutige Computereperimente beinhalten jedoch wesentlich mehr als nur die diskretisierten Grundgleichungen, wie dies von John von Neumann gedacht und mit den damaligen Rechnern auch nur möglich war. Computereperimente werden nicht nur mit umfangreichen Messdaten für spezifische Randbedingungen initialisiert, sie berücksichtigen auch immer zahlreiche Aspekte der

Anwendungskontexte in Form subskaliger Parametrisierungen.¹ Vor allem letzteres unterscheidet aktuelle Computerexperimente von den ersten computerbasierten Berechnungen der 1940er Jahre und lässt die heutigen Simulationsmodelle in ihrem Umfang erheblich anwachsen.

„Man hat verschiedene Namen für diese Verbindung von Modellierung und Berechnung geprägt: computational science oder Computersimulation oder einfach, wie der russische Mathematiker A.A. Samarskij, Computerexperiment. Er unterscheidet drei Phasen bei so einem Experiment: Modell – Algorithmus – Programm (MAP, vielleicht die Abbildung = map der Wirklichkeit in den Computern). Algorithmen sind die Vorschriften zur (im allgemeinen näherungsweise) Lösung der Modellgleichungen; Programm meint die Realisierung dieser Vorschriften, die Erstellung von Software. Programme sind letztendlich auch die Instrumente dieses Experiments; sie werden von Anwendern oft als Black box, das heißt ohne genaue Kenntnis des Modells und des Algorithmus, benutzt. Dabei verliert der Experimentator leicht die Mathematik aus den Augen, und, nur wenn etwas nicht funktioniert, etwa wenn das Experiment unglaubliche Werte liefert (oder jemand anderes mit anderen Instrumenten andere Ergebnisse erzielt), beginnt man über die ‚Richtigkeit‘ des Modells, über die Korrektheit der Algorithmen nachzudenken“ (Neunzert 1995: 49, 50).

Dass man bei den ersten Computerexperimenten die Mathematik aus den Augen verloren hätte, kann man nicht behaupten. Tatsächlich war zu Beginn der Computerentwicklung die Umsetzung der Modelle in maschinenuntaugliche Befehle eine rein mathematische Angelegenheit, da direkt – ohne Zwischenebenen wie Betriebssysteme, Software, spezifische Hardwarefunktionen – mit den Computern gearbeitet wurde. „Applying the modern term ‚to program‘ to a computer probably originated with the ENIAC team at Moore School. More often, though, they used the phrase ‚set up‘ to describe configuring the ENIAC to solve different problems. Setting up the ENIAC meant plugging and unplugging a maze of cables and setting arrays of switches. In effect, the machine had to be rebuilt for each new problem it was to solve. When completed in late 1945, the ENIAC operated much faster than any other machine before it. But while it could solve a complex mathematical problem in seconds, it might take days to set up the machine properly to do that“ (Cruzzi

1 Parameter sind Eigenschaften und Kenngrößen. In der Strömungsdynamik spielen subskalige Parametrisierungen eine wichtige Rolle, denn sie beschreiben all die Eigenschaften, Prozesse und Kenngrößen, die in den Gleichungen nicht enthalten sind und daher durch das Berechnungsraster fallen.

1998: 21).² Um die automatischen Rechenmaschinen der ersten Stunde bedienen zu können, musste die Ausführung von Berechnungen direkt als Befehle auf Maschinensprachebene formuliert oder wie bei ENIAC als Steckverbindungen eingestöpselt werden. Dabei folgten diese maschinentauglichen Befehle dem Prinzip der grundlegenden Rechnerarchitektur, komplexere Funktionen in einfache Grundfunktionen aufzulösen.³ Programmieren zu Beginn der Computerentwicklung bedeutete, per Hand eine Berechnung in einfachste, schrittweise abarbeitbare Operationen zu zerlegen. Typische ENIAC-Befehle waren „ $S(x) \rightarrow Ac$: Clear accumulator and add number located at position x in the Sceletrons into it“ (Goldstine, von Neumann 1947: 85). 1947 stellten von Neumann und Goldstine in dem Report *Planning and Coding Problems for an Electronic Computing Instrument* eine Methode vor, um die Abfolge der maschinentauglichen Befehle eines Berechnungsprozesses mit Hilfe von Flussdiagrammen zu vereinfachen. Für ihre graphische Methode entwickelten sie eine Darstellungsweise, die an eine Choreographie linearer Abläufe, Schleifen und Entscheidungspfade für die Verknüpfung der Operationen erinnert. Dabei definierten sie, was unter Coding zu verstehen ist:

„Coding is, of course, preceded by a mathematical stage of preparations. The mathematical or mathematical-physical process of understanding the problem, of deciding with what assumptions and what idealizations it is to be cast into equations and conditions, is the first step in this stage. The equations and conditions thus obtained are rigorous, with respect to the system of assumptions and idealizations that has been selected. Next, these equations and conditions, which are usually of an analytical and possibly of an implicit nature, must be replaced by arithmetical and explicit procedures. (These are usually step-by-step processes or successive approximation processes, or processes with both of these characteristics – and they are almost always characterized by multiple inductions.) Thus a procedure obtains, which is approximate in that sense in which the preceding one was rigorous. This is the second step in this stage. It should be noted that the first step has nothing to do with computing or with machines: It is equally necessary in any effort in mathematics or applied

-
- 2 Dies änderte sich im Laufe der Entwicklung von schnelleren Rechnern, höheren Programmiersprachen, Ein- und Ausgabegeräten wie Tastatur, Mouse und Bildschirm sowie allmählich anwachsenden Bibliotheken von Algorithmen für standardisierte und häufig verwendete Operationen.
 - 3 Computer waren und sind bis heute auf unterster Maschinenebene lediglich im Stande einfache Operationen auszuführen wie arithmetische und logische Operationen, bit-orientierte Operationen, Speicher-, Vergleichs- und Steueroperationen. Selbst heutige Rechner haben sich diesbezüglich nicht verändert, auch wenn auf der Ebene höherer Programmsprachen komplexere Berechnungen möglich geworden sind.

mathematics. Furthermore, the second step has, at least, nothing to do with mechanization: It would be equally necessary if the problems were to be computed ‚by hand’. Finally, the precision of the approximation process, introduced by the second step, must be estimated. [...] It may be carried out by the planner, ‚mathematically’, or it may be set up for computation, in which case it may be advantageous to have it, too, carried out by the machine.

Coding begins with the drawing of the flow diagrams. This is the *dynamic or macroscopic stage of coding*. [...] It has been our invariable experience that once the problem has been understood and prepared in the sense of the preceding first remark, the drawing of the flow diagram presents little difficulty“ (Goldstine, von Neumann 1947: 99, 100). „The next stage consists of the individual coding of every operation box, alternative box and variable remote connection. This is the *static or microscopic stage of coding*. Its main virtue is that the boxes in question can now be taken up one by one, and that the work on each one of them is essentially unaffected by the work on the others“ (Goldstine, von Neumann 1947: 101). „The last stage of coding consist of assigning all storage positions and all orders their final numbers. [...] These principles express all the restrictions that need be observed in the final, linear ordering of the boxes“ (Goldstine, von Neumann 1947: 103).

Diese mathematik- und maschinennahe Praktik der Codierung, die in ihrer Allgemeinheit bis heute zutreffend ist, thematisiert zwei neue Prinzipien computerbasierter Mathematik. Zum einen die Überwindung statischer Konzepte durch dynamische Abläufe und zum anderen die Implementierung von alternativen Pfaden, die sich in höheren Programmiersprachen als ‚goto‘-, ‚while‘- oder ‚if-else‘-Befehle wieder finden. Die Codierung zerlegt ein mathematisches Problem gemäß dieser Logik. Sowohl die Dynamik wie auch die Wahl alternativer Abläufe bildet die Basis, um das naturwissenschaftliche Prozessverständnis nicht nur zu beschreiben, sondern adäquat darzustellen und durch schrittweise Berechnungen im Computer auszuführen. Was bis dahin in seiner Dynamik den Experimenten in realiter vorbehalten war, lässt sich nun im rein Semiotischen der Computerexperimente realisieren.

Codierung, wie von Neumann und Goldstine 1947 beschrieben, war bis in die 1950er Jahre Handarbeit mit Bleistift und Papier. Ein Großteil der Codierung bestand jedoch aus Standardroutinen, die sowohl in der Codierung per Hand wie auch in ihrer maschinellen Ausführung zeitaufwendig waren. Insbesondere die Handhabung von Zahlen in der bis dahin üblichen Darstellung der Festkommazahlen kostete viel Zeit, um Fehler bei arithmetischen Überläufen, zu vermeiden. Waren die Ergebnisse einer Berechnung für den darstellbaren Zahlenraum eines Speichers zu groß, dann liefen sie über und verursachten Fehlberechnungen. „This meant that most of a programmer’s effort was scaling his calcula-

tion, not coding“ (Knuth, Prado 1980: 232). Berechnungen mussten für jeden Berechnungsschritt neu skaliert werden. Das heißt, es musste angegeben werden, ob das Ergebnis Einer, Zehner, Hunderter oder Tausender bedeutete, denn die Zahlenspeicher der ersten Computer waren zu klein, um längere Zahlen darzustellen. ENIAC beispielsweise konnte nur 20 Zahlen von je 10 Dezimaleinheiten speichern. „Thus even large inefficiencies in compiling or interpreting looping and testing operations and in computing addresses were masked by the fact that the most operation time was spent in floating-point subroutines. But the advent of the 704 with built-in floating-point and indexing radically altered the situation. [...] First it removed the *raison d'être* of earlier systems by providing in hardware the operations they existed to provide, and second, it increased the problem of generating efficient programs by an order of magnitude by speeding up floating-point operations by a factor of ten“ (Backus 1980: 131).⁴ Mit dem IBM 704 Computer wurde 1957 erstmals die Gleitkommaarithmetik eingeführt.

Ein weiterer Schritt zum wissenschaftlichen Rechnen, wie es heute üblich ist, war die Automatisierung der Codierung selbst durch die Entwicklung von Compilern und Programmiersprachen. Bis dahin mussten die Programmierer die Computer direkt in Maschinensprache instruieren. „At that time [1954], most programmers wrote symbolic machine instructions exclusively [...] they firmly believed that any mechanical coding method would fail to apply the versatile ingenuity which each programmer felt he possessed and constantly needed in his work“ (Backus 1964: 382). Doch Compiler, die die Befehle der Programmiersprache in Maschinensprache übersetzen, erleichtern die Arbeit und ermöglichen es, Programmiersprachen zu entwickeln. Der erste Compiler A-0 geht 1952 auf Grace Hopper, Nora Moser und Kollegen im UNIVAC-Team zurück. „To compile means to compose out of materials from other documents. Therefore, the compiler method of automatic programming consists of assembling and organizing a program from programs or routines or in general from sequences of computer code which have been made up previously“ (Moser zitiert in: Knuth, Pardo

4 Fließkommazahlen approximieren reelle Zahlen und speichern zum Wert einer Zahl die Stelle des Kommas ab. Beispielsweise wird die Angabe der Lichtgeschwindigkeit nicht als 299.792.458 m/s, sondern als $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s gespeichert, wobei der Wert der Mantisse für einen Wertebereich [1, 10] normalisiert wird. In Digitalrechnern werden Fließkommazahlen mit 32 oder 64 Bit dargestellt und beschränken daher die Länge der Zahlen. Dies kann zu Rundungsfehlern führen, was vor allem für die Simulation zu Problemen führte.

1980: 234). Allerdings dauerte es eine Weile, bis Compiler und andere Programmierhilfen benutzt wurden.

Die erste, tatsächlich realisierte Programmiersprache war FORTRAN Formula Translation, die zu Beginn der 1950er Jahre von John Backus entwickelt wurde und bis heute für zahlreiche Simulationsmodelle in den Naturwissenschaften verwendet wird (vgl. Backus 1954).⁵ Hinter der Entwicklung von FORTRAN stand laut Backus die Frage, „what could be done now to ease the programmer’s job? Once asked, the answer to this question had to be: Let him use mathematical notations. But behind that answer (in the new 704 environment) there was the really new and hard question: Can a machine translate a sufficiently rich mathematical language into a sufficiently economical machine program to make the whole affair feasible?“ (Backus 1980: 131). Letztere Frage ist nicht trivial und betrifft die Konsistenz eines Programms. Denn es muss sichergestellt sein, dass der Computer tatsächlich die programmierte Berechnung ausführt. Solange der Codierer seine Berechnungen direkt in maschinenaugliche Befehle überträgt, kann er selbst die Konsistenz überprüfen. Wird die Übersetzung jedoch an eine Programmiersprache und einen Compiler delegiert, muss sich der Programmierer auf das Tool verlassen. FORTRAN erlaubte es nun, die bis dahin per Hand codierten, maschinenauglichen Befehle mathematischer Berechnungen bequem in den gewohnten mathematischen Notationen darzustellen wie die Berechnung von Funktionen (COSF (X), SINF (X), EXPE (X), etc.). Gleichwohl andere Programmiersprachen in dieser Zeit entwickelt wurden, beispielsweise MATH-MATIC von Grace Hopper für UNIVAC Computer, setzte sich FORTRAN, das ab 1957 mit den IBM 704 Computern ausgeliefert wurde, in den Natur- und Ingenieurwissenschaften durch.⁶

FORTRAN verrät den Ursprung der Computerentwicklung, der in der Effizienzsteigerung des wissenschaftlichen Rechnens lag. Heute gibt

5 Als erste Programmiersprache gilt mittlerweile Konrad Zuses Plankalkül aus dem Jahr 1945. Allerdings publizierte Zuse aufgrund der Wirren der Nachkriegszeit seine Konzepte erst wesentlich später (vgl. Zuse 1972).

6 Mit dem IBM 704 Computer brach die Ära der Massenfertigung von Großrechnern an und dementsprechend vergrößerte sich die Gruppe der FORTRAN-Anwender laufend. Im April 1958 benutzte bereits die Mehrzahl der Nutzer, der bis dahin 26 installierten 704 Systeme, FORTRAN (vgl. Backus 1958). FORTRAN wurde seither mehrmals verändert, insbesondere als FORTRAN-77 („do“-Schleifen, „if-then-else-endif“-Statement, etc.) und Fortran90 (Modules, etc.). „The latest version, Fortran90, has incorporated many new ideas, including some of those used in object-oriented programming, but scientific programmers generally are aware of only one of them: array syntax“ (Decyk, Norton, Szymanski 1997: 13).

es nicht nur weitere Programmiersprachen wie Simula, Pascal, C oder C++, sondern kommerzielle mathematische Werkzeuge wie Mathematica, MathWorks oder MATLAB sowie einen ständig wachsenden Markt für spezielle Modellierungssoftware vor allem für den technischen Bereich (vgl. Softguide 2009). Zahlreiche standardisierte Tools wie PDE Partielle Differentialgleichungen Löser erleichtern die Programmierung von Simulationsmodellen. Die Tendenz geht mittlerweile dahin, komplette Computerexperimente als vorgefertigte Softwareprodukte anzubieten. Diese Entwicklung zeigt, dass mathematische Verfahren zu einem weit verbreiteten Handwerkszeug geworden sind. Es zeigt aber auch, dass die Softwareentwicklung die zugrunde liegenden mathematischen Prozesse zunehmend als Blackboxes maskiert. Damit werden mathematische Wissensbestände in Algorithmen festgeschrieben und popularisiert. Was sich bereits 1936 als Entwicklung abzuzeichnen begann – „there is a great deal more arithmetic and better arithmetic in the world than there used to be“ (Bush 1936: 652) – gilt heute in einem nie da gewesenen Umfang.

Computational Departments

Der Zuwachs an Arithmetik durch die Entwicklung automatischer Rechenmaschinen zeigt sich an den Universitäten und Forschungsinstituten in der Gründung von Computational Departments. Die Vorläufer dieser Departments waren die Human Computing Laboratories.

„The Winter of 1943 marked the start of the imperial age of the human computers, the era of great growth for scientific computing laboratories. It seemed as if all the combatants discovered a need for organized computing this winter. A German group started preparing mathematical tables at the Technische Hochschule in Darmstadt. Japan [...] formed a computing group in Tokyo. The British government operated computing groups in Bath, Wynton, Cambridge, and London. Within the United States, there were at least twenty computing organizations at work that winter, including laboratories in Washington, Hampton Roads, Aberdeen, Philadelphia, Providence, Princeton, Pasadena, Ames, Lynn, Los Alamos, Dahlgren, Chicago, Oak Ridge, and New York. Most of these calculating staffs were small, consisting of five to ten computers. [...] Only a few computing laboratories were as large as the New York Hydrographic Project with its forty-nine veterans of the Mathematical Table Project or the thirty-person computing office of the Naval Weapons Laboratory at Dahlgren, Virginia“ (Grier 2005: 257).

Daher ist es kein Zufall, dass die ersten automatischen Rechenmaschinen vom Militär in Auftrag gegeben wurden, um die Berechnungen zu beschleunigen und dadurch Mitarbeiter einzusparen.⁷ So entstanden ENIAC und später EDVAC zwar an der Moore School of Electrical Engineering der Universität von Pennsylvania, doch Auftraggeber war das US-Militär. ENIAC wurde 1947 und EDVAC 1949 an das Ballistic Research Laboratory der US Army in Aberdeen Maryland ausgeliefert. Beide Computer entstanden unter Mitwirkung von John von Neumann, der sowohl Mitglied im wissenschaftlichen Beirat des Ballistic Research Laboratory als auch im Navy Bureau of Ordnance war. Das Ballistic Research Laboratory in Aberdeen mit ENIAC 1947 und EDVAC 1949 als auch das Naval Surface Weapons Center in Dahlgren mit den IBM Computern Mark II 1948, Mark III 1951 und NORC 1954 können wohl als die ersten Computational Departments bezeichnet werden. Umso erstaunlicher ist es, dass sich John von Neumann 1945 – auf der Suche nach einem geeigneten mathematischen Problem zum Test seines geplanten Princeton IAS Computers – für ein rein wissenschaftliches Projekt entschied.⁸ „[Carl-Gustav] Rossby, Vladimir Zworykin of RCA, and Weather Bureau Chief Francis Reichelderfer, had succeeded in convincing von Neumann that weather prediction was a good candidate for his computer“ (Phillips 2000: 15). Die Wettervorhersage, bis weit in die

7 Welcher Computer nun als der erste Computer gelten kann, ist nicht einfach zu beantworten. Auch standen nicht alle Computer im Dienste militärischer Zwecke. Beispielsweise wurde der elektrisch angetriebene mechanische Rechner Z1 von Konrad Zuse 1938 im elterlichen Wohnzimmer gebaut, jedoch während des Krieges zerstört. 1941 baute Zuse ebenfalls in seiner Privatwohnung die Z3, den ersten vollautomatisch arbeitenden Computer mit binärer Gleitkommarechnung, Speicher und Zentralrechen-einheit. Weitere Computer waren der nicht frei programmierbare ABC Atanasoff-Berry-Computer, den John Atanasoff und Clifford Berry in den Jahren 1937 bis 1941 am Iowa State College konstruierten, Mark I, der 1944 als Dezimalrechner von IBM für die Harvard Universität gebaut, sowie Colossus, der 1943 in Bletchley Park unter Mitwirkung von Alan Turing erstellt wurde. Colossus war wie ENIAC nur durch Neuverkabelung programmierbar und diente der Entzifferung der deutschen Lorenz-Schlüsselmaschine. Die Kriterien für einen modernen Computer sind: Binäre Zahlendarstellung, elektronische Realisierung, freie Programmierbarkeit, Turingmächtigkeit und ggf. Gleitkommaarithmetik.

8 John von Neumann war seit 1933 Mitglied des IAS Institute for Advanced Study in Princeton und gründete dort eine Gruppe für die Konzeption und den Bau des IAS Computers, der im Frühjahr 1951 fertig gestellt wurde. „During the summer of 1951, a team of scientists from Los Alamos came and put a large thermonuclear calculation on the IAS machine; it ran for 24 hours without interruption for a period of about 60 days“ (Bigelow 1980: 308).

1960er Jahre eine Erfahrungswissenschaft und Kunst, gehörte zu jenen Disziplinen, die am Schisma zwischen Theorie und Anwendung laborierten. 1904 hatte Vilhelm Bjerknes zwar die theoretischen Grundlagen auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen der Strömungsdynamik gelegt (vgl. Bjerknes 1904), doch die Gleichungen waren zu komplex, um sie per Hand zu berechnen, geschweige denn, um sie auf ein einfaches Erdmodell anzuwenden.⁹ Carl Gustav Rossby, ein Meteorologe der Universität Chicago, erhoffte sich von einem Simulationsmodell einen entscheidenden Durchbruch für die theoretische Fundierung der Meteorologie. „To lay the foundation for a computational approach to theoretical meteorology, it would be necessary to organize a small and versatile group of competent theoretical meteorologists to work with Professor von Neumann“ (Rossby 1946, in: Harper 2004: 85). Es dauerte jedoch noch zwei Jahre bis sich 1948 mit Jule Charney eine erste Gruppe wissenschaftlicher Modellierer zusammenfand, die am IAS Institute for Advanced Study in Princeton an einem computertauglichen Wettervorhersagemodell arbeiteten. Dabei handelte es sich um ein sehr einfaches Modell basierend auf den Navier-Stokes-Gleichungen. Die sieben Variablen zur Bestimmung der Atmosphäre sollten für ein sehr grobes Berechnungsgitter einer gleichmäßig rotierenden Erde gelöst werden. Erste Modellrechnungen waren für 1950 geplant. Da der IAS Computer jedoch noch nicht fertig gestellt war, wurden die Berechnungen im April 1950 auf ENIAC ausgeführt. Eine 24-Stunden-Vorhersage benötigte 24 Stunden reine Rechenzeit auf ENIAC. Da ENIAC zu dieser Zeit bereits vom Ballistic Research Laboratory für ballistische Berechnungen genutzt wurde, konnten nicht mehr als vier 24-Stunden-Vorhersagen und zwei 12-Stunden-Vorhersagen durchgeführt werden (vgl. Phillips 2000).

Die Forschergruppe des Meteorological Projects des Institute for Advanced Study in Princeton um Charney, von Neumann und, in wechselnder Besetzung weiterer Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen, wie Norman Phillips, Joseph und Margaret Smagorinsky, bestand zwischen 1948 und 1955 als eine der ersten Modellierungs- und Simulationsgruppen der sich formierenden Computational Sciences. Sie nutzten neben ENIAC den IAS Computer und NORC. Auch wenn das Office of Naval Research das Projekt finanzierte, kann das meteorologische Computerexperiment von 1950 als eines der ersten, wenn nicht sogar als das erste Computerexperiment der akademischen Naturwissenschaften gelten. Auf alle Fälle gilt es als Beginn der numerischen Wettervorhersage und wurde im Jahr 2000 zum 50-jährigen Jubiläum mit einem interna-

9 Lewis F. Richardson hatte 1922 versucht, eine Berechnung per Hand durchzuführen, doch er scheiterte (vgl. Richardson 1922, Lynch 1999).

tionalen Symposium gefeiert (vgl. Spekat 2000). Dieses erste Computerexperiment dokumentiert die enge Zusammenarbeit zwischen Computerdesignern und Modellierern, die bis heute besteht. 1954 zog John von Neumann auf einem Vortrag in Deutschland die Bilanz seiner Erfahrungen mit diesem ersten Computerexperiment: „Übrigens waren diese Bemühungen recht erfolgreich, so daß der Wetterdienst der Vereinigten Staaten zusammen mit der Marine und der Luftwaffe auf Grund unserer Methoden einen dauernden rechnerischen Wettervorhersagedienst einrichtet. Dieser wird wohl im Laufe des nächsten Jahres mit einer großen, vollautomatischen Schnellrechenmaschine (vom Typ ‚701‘ der IBM International Business Machine Corporation) regelmäßig funktionieren“ (von Neumann 1954: 264).¹⁰ Ein Jahr später gründete Joseph Smagorinsky auf von Neumanns Betreiben die General Circulation Research Section im U.S. Weather Bureau, die 1986 als GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory in Princeton angesiedelt wurde.

Diese Entwicklung, ausgehend von einer kleinen Gruppe von Wissenschaftlern, ist charakteristisch für die Entstehung der Computational Sciences und den sich institutionell etablierenden Computational Departments. In nahezu allen naturwissenschaftlichen Disziplinen sind in den letzten fünfzig Jahren – neben den klassischen Instituten und Departments für experimentelle Forschung und Theorie – Computational Departments entstanden. Diese neuen Departments dokumentieren die Revolution der wissenschaftlichen Methoden. Neben Theorie, Experiment, Beobachtung und Messung kommt in den 1950er Jahren, verstärkt ab den 1970er Jahren, nun die Simulation als neues Erkenntnisinstrument hinzu. Die neu eingerichteten Computational Departments folgen einer eigenen Forschungslogik, die durch die numerische Analyse komplexer Systeme, anwendungs- wie problemorientierte Forschungsfragen, eine hochgradig interdisziplinäre Zusammenarbeit und internationale Vernetzung sowie die Abhängigkeit des Erkenntnisfortschritts von der Leistungsfähigkeit der Rechner gekennzeichnet ist. Und sie verfügen über eine eigene Infrastruktur (e-Science). Exemplarisch zeigt sich die Konzeption eines solchen Departments am Center for Computational Geophysics der Rice Universität: „The Center for Computational Geo-

10 „By 1954, both modeling capability and computer power had advanced to a point where the possibility of real-time operational numerical weather prediction was under active consideration in Europe and the United States. On July 1, 1954, the Joint Numerical Weather Prediction Unit (JNWPU) was organized, staffed, and funded by the U.S. Weather Bureau, the U.S. Air Force, and the U.S. Navy” (NOAA 2008: Foundations, The History of Numerical Weather Prediction).

physics was established in 1998 to promote cross-disciplinary studies of the Earth requiring large computational resources. Comprised of 11 faculty members and research associates from the Earth Science, Computational & Applied Mathematics, and Electrical & Computer Engineering Departments, the Center has research areas in petroleum, environmental, and academic seismology, lithosphere and whole mantle geodynamics, and fault mechanics“ (Rice University 2008: Earth Science).¹¹

„Computational Science,“ schreibt Friedel Hoßfeld, einer der Pioniere des wissenschaftlichen Rechnens in Deutschland, „ist synonym mit der Untersuchung komplexer Systeme; ihr Instrument ist der Supercomputer, ihre Methode die Simulation. [...] sie zielt auf die großen ungelösten, wissenschaftlichen Probleme, die in ihrer Wichtigkeit und Tiefe nicht nur die betreffende wissenschaftliche Disziplin herausfordern, sondern von außerordentlicher Bedeutung und Auswirkung für die Gesellschaft und ihrer Bewältigung der Zukunft sind. Die Identifizierung solcher Probleme hat in den USA zur Klassifizierung als ‚Grand Challenges to Computational Science‘ geführt, zu denen heute die Kernfragen aus den Gebieten der atmosphärischen Chemie (d.h. der Umweltforschung), der Astrophysik, der Materialforschung, der Molekularbiologie, der Elementarteilchenphysik und der Aerodynamik gezählt werden“ (Hoßfeld 1991: 1).

e-Science

Die Nutzung von Computern als Forschungsinstrumente, die weltweite Vernetzung der elektronischen Infrastrukturen und die flächendeckende Vermessung der Welt durch computerchipgesteuerte Detektoren führte Anfang des 21. Jahrhunderts zum Begriff der e-Science. „e-Science is about enhancing science through global collaboration using computing and communications technologies. e-Science integrates grid computing, programming tools, and data and visualization technologies enabling scientists to gain greater insight into their research through direct comparisons of simulations, experiments and observations. Knowledge repositories maintaining relationships, concepts and inference rules will be accessible through e-Science to facilitate these new insights“ (Berg et al. 2003: 5). Ziel der e-Science ist es, alle größeren Rechenzentren, Experimentier- und Messgeräte miteinander zu vernetzen und über Institutio-

11 Da es noch keinerlei infrastrukturelle Forschungen zu diesem Umbau der Naturwissenschaften gibt, fehlt ein deutschlandweiter und internationaler Überblick der Computational Departments. Einen indirekten Einblick in die Orte der Computational Sciences gibt die *TOP500 Liste* der weltweit schnellsten Rechner (vgl. TOP500 2009).

nen- und Ländergrenzen hinweg als virtuelles Labor verfügbar zu machen (Grid-Computing). Zahlreiche Länder konzipieren mittlerweile umfangreiche Förderprogramme für solche virtuellen Labore. Dabei stellen die Supercomputer in den weltweiten Rechenzentren sowie die Datenleitungen zwischen diesen Zentren die Kerninfrastruktur des verteilten Rechnens und Forschens dar.

Die Voraussetzung dafür sind Entwicklungen aus den 1970er Jahren. 1976 kam mit dem Cray-1 Vektorrechner der erste Supercomputer mit einer Geschwindigkeit von 80 Millionen Gleitkommazahl-Operationen pro Sekunde auf den Markt.¹² Im selben Jahr wurde an der Universität Illinois der erste Parallelrechner mit 256 Prozessoren gebaut (ILLIAC 4). Bereits 1975 waren weltweit 57 Großrechner im ARPANET Advanced Research Projects Agency Network miteinander vernetzt, die meisten davon in den USA. Das ARPANET war 1969 mit der Vernetzung von vier Forschungseinrichtungen gestartet: Stanford Research Institute (SDS 940), Universität von Utah (DEC PDP-10), Universität von Kalifornien in Los Angeles (SDS Sigma 7) und in Santa Barbara (IBM 360/75). Doch erst die Entwicklung des Mehrbenutzer-Betriebssystems UNIX Anfang der 1970er Jahre in den Bell Laboratories – bis heute das gängige Betriebssystem der Großrechner – und die ebenfalls zu Beginn der 1970er Jahre in den Bell Laboratories entwickelte Programmiersprache C verhalfen der Vernetzung von Computern zum Durchbruch. Dieser Durchbruch führte 1982 zum Internet und 1989 zum World Wide Web, wobei es das erklärte Ziel des World Wide Web war, Forschungsergebnisse leichter austauschen zu können (vgl. Berners-Lee 1989).

12 Von den insgesamt achtzig gebauten Cray-1 wurde der erste dieser Rechner 1976 an das Los Alamos National Laboratory, der zweite ein Jahr später an das 1960 gegründete NCAR National Center for Atmospheric Research ausgeliefert und der dritte Computer an das 1975 gegründete ECMWF European Centre for Medium Range Weather Forecasts ausgeliefert. In den 1960er und frühen 1970er Jahren gab es neben IBM sechs kleinere Hersteller von Großrechnern in den USA: Burroughs, UNIVAC, NCR National Cash Register, CDC Control Data Corporation, Honeywell, RCA Radio Corporation of America und General Electric. CDC baute mit dem CDC 6600 Rechner (3 MegaFLOPS Rechenleistung) bereits 1964 einen Großrechner, der mit dem Begriff Supercomputer bezeichnet wurde. CDC Chefentwickler Seymour Cray verließ 1972 das Unternehmen und gründete die Cray Research, ein weiteres Großrechner-Unternehmen. 1997 wurde mit dem Intel ASCI Red/9152 (1,338 TeraFLOPS Rechenleistung) für die Sandia National Laboratories in New Mexiko die TeraFLOP-Grenze überschritten. Heute stößt man in den Bereich der PetaFLOPS vor. In Deutschland stellte Konrad Zuse mit seinem Unternehmen die ersten kommerziell vertriebenen Großrechner her.

In den 1970er Jahren wurden auch die Ein- und Ausgabegeräte zunehmend benutzerfreundlich. 1973 wurde mit dem Xerox Alto der erste Computer mit Maus, graphischer Benutzeroberfläche und Ethernetkarte ausgeliefert. Die Monitore wurden verbessert und Magnetbänder als auch Festplatten lösten zunehmend die Lochkarten und Lochstreifen als Eingabegeräte ab.¹³ Die zunehmende Leistungsfähigkeit der Computer sowie der Kernspeicher – Ende der 1970er Jahre verfügten die Großrechner über rund 1 MegaByte Arbeitsspeicher – erlaubten die ersten Visualisierungen. Schließlich begann mit dem Intel 4004 Chip, der 2.300 Transistoren zu einer CPU Central Processing Unit zusammenfasste, in den 1970er Jahren das Zeitalter der Mikroprozessoren (vgl. Flik 2004). Zum Vergleich: ENIAC war ein zimmergroßer Prozessor bestehend aus rund 18.000 Elektronenröhren.

Mit der Installation des Cray X-MP Vektorrechners und der Gründung des HLRZ Höchstleistungsrechenzentrums an der Universität Stuttgart begann in Deutschland 1983 die Ära des Höchstleistungsrechnens. Die Supercomputer sind die Stars dieser Ära.¹⁴ „Was die Teilchenbeschleuniger für die Experimentalphysik sind, leisten die Höchstleistungsrechner für die Computational Sciences: Die Supercomputer sind die Beschleuniger der Theorie! Der Transfer des Wissens und Könnens auf dem Gebiet des Supercomputing, insbesondere des Parallelrechnens, wird jedoch für die zukünftige Konkurrenzfähigkeit der Industrie im nationalen Wettbewerb ein wichtiger Wirtschaftsfaktor werden [... und] man ist wohl auch genötigt, eine enge Korrelation zwischen Verfügbarkeit des Supercomputing für die Industrie und deren Leistungsfähigkeit am Weltmarkt zu vermuten“ (Hoßfeld 1992: 3; Jarp

13 1952 stellte IBM mit dem IBM 726 Bandgerät das erste Datenspeichermedium auf Basis von Magnetbändern her. Das Gerät konnte 1,4 Megabyte aufzeichnen. 1956 entwickelte IBM mit RAMAC 305 die erste Festplatte, ein tausend Kilo schweres Ungetüm von 60 Platten für 5 Megabyte Daten (vgl. Magnetbandmuseum 2009).

14 Während in den USA etliche Hersteller von Supercomputern ansässig waren, hatte in Deutschland die Zuse KG, die 1949 mit der Z4 den ersten kommerziell vertriebenen Großrechner in Europa an der ETH Eidgenössische Technische Hochschule Zürich installiert hatte, den Betrieb eingestellt bzw. war 1969 in den Besitz der Siemens AG übergegangen (vgl. Zuse 2008). Siemens und Telefunken bauten in den 1970er und 1980er Jahren Großrechner wie den Siemens VP200-EX, den Siemens S100/10 oder den Telefunken TR440. 1985 nahm die GMD Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mit dem Bau des SUPRENUM Rechners, einem Parallelrechner mit 256 Prozessoren, ein innovatives Projekt in Angriff. 1990 wurde der Rechner in St. Augustin in Betrieb genommen, aber obwohl die Architektur richtungsweisend war, scheiterte das Projekt kommerziell.

1991). Diese Einsicht in die Bedeutung des Höchstleistungsrechnens für Industrie, aber auch Wissenschaft und Forschung setzte sich in Deutschland jedoch nur langsam durch. Die Situation der Klimaforschung beispielsweise verbesserte sich erst 1985, als das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg mit einem CYBER 25 Supercomputer ausgestattet wurde und 1988 die Gründung des DKRZ Deutsches Klimarechenzentrum in Hamburg mit einem CRAY-2 System erfolgte. Während in Deutschland im Jahr 1992 43 Großrechner installiert waren, davon 26 in wissenschaftlichen Institutionen,¹⁵ und insgesamt 31 Mio. Mark für paralleles Höchstleistungsrechnen ausgegeben wurden, waren im selben Jahr in den USA 240 der weltweit 616 Supercomputer installiert und es wurden 657 Mio. US Dollar für HPCC High Performance Computing and Communication ausgegeben (vgl. BMFT 1993).¹⁶

„Relativ spät, aber vielleicht noch rechtzeitig, wurde der Stellenwert der Computational Sciences und des Supercomputing wie die Notwendigkeit für entsprechendes Handeln auch in Europa erkannt: Der Rubbia-Report liefert für die EG eine eingehende Analyse der europäischen Situation auf dem Gebiet des Supercomputing und seines industriellen Umfeldes und eine Reihe strategischer Empfehlungen; mehrere Arbeitsgruppen haben Aktionslinien identifiziert und Rahmenempfehlungen für die Umsetzung des High Performance Computing and Networking (HPCN) Program in einem 7-Jahres-Plan ausgearbeitet, das im Mittel ein jährliches Fördervolumen von 900 Mio. Ecu umfassen soll. Es ist zu hoffen, daß das Programm bald und im empfohlenen Umfang von der EG verwirklicht wird“ (Hoßfeld 1992: 3; vgl. Rubbia 1991).¹⁷

15 Unter diesen 26 Großrechnern des Jahres 1992 in fünf Forschungszentren (MPI Max Planck Institut Garching, DLR Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum Oberpfaffenhofen, DKRZ Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg, Forschungszentren Jülich und Karlsruhe), dem DWD Deutscher Wetterdienst Offenbach sowie sechzehn Universitäten (Berlin, Stuttgart, Karlsruhe, Kiel, Kaiserslautern, Köln, München, Hannover, Aachen, Dresden, Bremen, Gießen, Kassel, Frankfurt, Hamburg, Darmstadt) waren zwölf Cray, zwölf Siemens und ein NEC Computer (BMFT 1993: 12).

16 Zum Vergleich: 1992 standen 240 Supercomputer in den USA/Kanada und 138 in Europa, darunter 43 in Deutschland, 35 in Frankreich und 24 in Großbritannien (vgl. Meuer 1992).

17 „Besonders traurig in diesem Zusammenhang ist es, wenn staatliche Förderungsinitiativen außer Sitzungen nichts produzieren: Während die US-Amerikaner den Ernst der Stunde anscheinend erkannt und konzentrierte Aktivitäten gestartet haben, erweckt die europäische Rubbia-Initiative den Eindruck eines Debattierclubs, der wegen diverser Partikularinteressen Gefahr läuft, Zeit und den Anschluß an das ‚Weltniveau‘ im Supercomputing zu verlieren“ (Jehnsen 1992). Die Situation Anfang der 1990er Jahre hatte sich bezüglich des Baus von Supercomputern verändert. Während in Europa keine Großrechner mehr gebaut wurden, drohten die US-amerikanischen Hersteller gegenüber den japanischen Unternehmen wie

Doch es geht in den 1990er Jahren nicht nur um Großrechner. „Die Installation von Höchstleistungsrechnern setzt notwendigerweise voraus, daß einem breiten Kreis potentieller Nutzer auch von außen Zugriff auf diese Rechner ermöglicht wird. Erforderlich ist dazu die Einbettung der Rechner in ein leistungsfähiges Netz, das insbesondere für den schnellen Austausch von Massendaten [...] geeignet ist. Für den Anwender muß der Zugriff auf den Rechner so erfolgen können, als ob dieser im eigenen lokalen Netz zur Verfügung stünde“ (BMFT 1993: 25). Es ist dieser direkte Zugriff und die damit einhergehende infrastrukturelle Umgestaltung der Wissenschaft, welche die e-Science charakterisiert. Heute ist im Zuge dieser Umgestaltung von Parallelrechnern mit 212.992 Prozessoren (IBM BlueGene/L) die Rede, von Datennetzen mit Transferleistungen von 10 Gigabit/sec, von Programmen, die via Internet den weltweiten Zugriff auf Supercomputer, Experimentier- und Messgeräte erlauben, sowie von Rechenzentren, die zunehmend als Dienstleister für Natur- und Ingenieurwissenschaften fungieren.¹⁸ Im Zuge dieser neuen Dienstleistungen der e-Sciences schließen sich immer mehr Rechenzentren zusammen. So wurde 2007 Europas größtes Rechenzentrum, das Gauss Centre for Supercomputing, durch den Zusammenschluss dreier Rechenzentren gegründet (NIC John von Neumann-Institut für Computing Jülich, LRZ Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Garching und HLRZ Höchstleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart). Das Gauss Centre wiederum ist mit fünfzehn weiteren Supercomputerzentren Teil von PRACE Partnership for Advanced Computing in Europe. In dem EU Memorandum vom April 2007 heißt es dazu: „Computation has become essential for the advancement of all research across science. But the high-performance computing resources are limited and a European effort is needed to treat the provisioning in a strategic way. Together the 16 members of PRACE, the Partnership for Advanced Computing in Europe, will strengthen European science, engineering and supercomputer technologies and thus se-

Fujitsu, Hitachi und NEC zunehmend ins Abseits zu geraten. Der in Anlehnung an den Sputnik Schock der 1950er Jahre als ‚computnic race‘ betitelte Wettlauf zwischen US-amerikanischen und japanischen Unternehmen wurde Ende der 2004 mit dem IBM BlueGene/L entschieden.

18 Die Bestandsaufnahme der aktuellen Situation in Deutschland zeigt, dass hier zwar keine Supercomputer mehr gebaut werden, dass aber mit dem im Forschungszentrum Jülich Anfang 2008 installierten und 2009 erweiterten JUGENE Blue Gene/P (294.912 Prozessoren), der weltweit drittschnellste Computer steht. Die Liste der TOP500 Rechner zeigte im Juni 2009, dass nur sechs Prozent der Rechenkraft der fünfhundert leistungsfähigsten Computer in Deutschland zur Verfügung stehen (vgl. TOP500 2009).

cure Europe a pioneering role in the global competition“ (PRACE 2007: Memorandum).

Um diese Ressourcen zu vernetzen, bedarf es leistungsfähiger Datennetze und Softwareprogramme, die das verteilte Höchstleistungsrechnen ermöglichen. In Deutschland vernetzt seit 1990 das WIN Wissenschaftsnetz des Deutsches Forschungsnetz e.V. die Forschungsinstitutionen und Universitäten. Heute bietet diese Infrastruktur eine Transferleistung im Gigabit/s-Bereich und wird zunehmend ausgebaut,¹⁹ denn „nachdem in den 90er Jahren das World Wide Web das Internet revolutionierte, sehen wir uns nun einer weiteren revolutionären Entwicklung gegenüber: dem Grid-Computing. Während das Web in der Regel nur statische Informationen bereitstellt, ermöglicht das Grid nun den direkten Zugriff auf die Ressourcen selbst, wie Rechner, Speicher, wissenschaftliche Instrumente und Experimente, Anwendungen und Daten, Sensoren und sogenannte Grid-Middleware Dienste. Letztere basieren auf weit verbreiteten Grid- und Web-Services-Standards, die die effiziente Kommunikation der Ressourcen untereinander ermöglichen“ (Neuroth, Kerzel, Gentzsch 2007: 9, vgl. D-Grid 2009). Dazu wird ein Interface benötigt, das sowohl die verschiedenen Computer und Geräte von einer gemeinsamen Oberfläche aus zugänglich macht, als auch das Datenmanagement der Massendaten ermöglicht. Mit dem Projekt UNICORE Uniform Interface to Computing Resources wurde ab 1997 ein solches Interface auf Basis der Erfahrungen des Höchstleistungsrechnens in den Großrechenzentren programmiert (vgl. UNICORE 2008). Das Deutsche Forschungsnetz wie auch das D-Grid, UNICORE oder das Gauss Centre (vgl. GCS 2009) sind wiederum Teil europäischer Initiativen wie dem europäischen Wissenschaftsnetz GEANT basierend auf 26 nationalen Forschungsnetzen (vgl. GEANT 2009), dem e-Infrastructure Programm der EU Europäischen Union (vgl. e-Infrastructure 2009), dem I2G Interactive European Grid Project (vgl. I2G 2009) oder der DEISA Distributed European Infrastructure for Supercomputing Applications (vgl. DEISA 2009). Schließlich bildet sich mit der Gründung des IAS Institute for Advanced Simulation 2008 am Forschungszentrum Jülich ein neuer Typ wissenschaftlicher Institute

19 Das WIN Wissenschaftsnetz wird vom DFN Deutsches Forschungsnetz e.V. verwaltet, der 1984 gegründet wurde. 1994 wurde ein Testbed mit einer Transferleistung von 34 Mbit in Nordrhein-Westfalen, Bayern, Berlin, Norddeutschland und Hessen sowie ein regionales Hochgeschwindigkeitsnetz von 155 Mbit/s in Baden-Württemberg installiert. 1996 wurde es bundesweit zum B-WIN Breitband-Wissenschaftsnetz (155 Mbit/s) und seit 2000 zum G-WIN Gigabit-Wissenschaftsnetz (2,5 – 10 Gbit/s) ausgebaut (vgl. Wissenschaftsrat 2002, DFN 2008).

heraus: ausschließlich jene Wissenschaftsbereiche werden unterstützt, deren Erkenntnisfortschritt ausschließlich von Simulationen abhängt. Typische Anwendungsfelder sind quantentheoretische Untersuchungen, Astrophysik, Materialforschung, Biophysik sowie die Theorie der Strukturbildung (vgl. IAS 2009).

Die Umgestaltung der Naturwissenschaften zur e-Science beinhaltet vielfältige Aspekte wie die Entwicklung neuer Infrastrukturen, die Um- und Neuverteilung von Ressourcen, die Entstehung neuer Grid-Communities bis hin zu veränderten Anforderungen an die naturwissenschaftliche Ausbildung. Es entstehen neue Studiengänge wie Technomathematik, Scientific Computing oder Wissenschaftliches Rechnen sowie Graduiertenschulen wie die Heidelberg Graduate School of Mathematical and Computational Methods for the Sciences (vgl. MATHCOMP 2009). Die beiden maßgeblichsten Einflüsse zeigen sich jedoch in der Transformation der Epistemik und Praktik wissenschaftlichen Forschens. Computereperimente werden aufgrund der Rechnerkapazitäten nicht nur zunehmend realitätsnaher. Ihre Einbindung in den bisherigen Kanon der Wissensproduktion von Beobachtung, Experiment und Messung – alle drei Erkenntnisinstrumente haben sich mittlerweile zu algorithmierten und hochgradig datenproduzierenden Forschungsmethoden entwickelt – wird durch automatisierte Datenvergleiche, Datenauswertungen und Daten-Reinterpretationen professionalisiert und standardisiert. Die Infrastrukturen der e-Science verändern die Forschungspraktiken grundlegend, nicht nur im digitalen Labor des Computers, sondern in den zu virtuellen Laboratorien vernetzten Supercomputern, Experimentier- und Messgeräten. Die Folge all dieser Veränderungen ist: „Software is the new physical infrastructure of [...] scientific and technical research“ (PITAC 1999: 27). In anderen Worten: Das komplette Wissen der Naturwissenschaften wird sukzessive in Algorithmen transformiert.

II WISSENSCHAFTSFORSCHUNG

1 VON EINFACHEN MODELLEN ZU ERDSYSTEMEN

In keiner Disziplin anderen zeigt sich die Bedeutung des Computers als Forschungs-, Experimentier- und Prognoseinstrument deutlicher als in der Klimaforschung. Das sozio-politische Interesse an den Resultaten der Klimamodellierer hat die Klimaforschung zu einer der führenden Simulationswissenschaft werden lassen. Der Computer wird als Labor für Experimente mit dem simulierten Klima genutzt, und durch diese Computerexperimente hat sich die Klimaforschung in den letzten Jahrzehnten zu einer experimentellen Wissenschaft gewandelt. Diese neue Form der Experimentalkultur wird seit 1989 durch die alle fünf bis sechs Jahre erscheinenden Assessment Reports des IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change in einzigartiger Weise synchronisiert. Die internationale Koordinierung von mehr als zwanzig Klimamodellen hat eine prototypische, epistemische Kultur des Simulierens geschaffen, mit einer internationalen Infrastruktur der Modellentwicklung, des Modelltests und des Vergleichs von Simulationsmodellen und -resultaten. Daher ist die Klimaforschung wie kein anderes Wissenschaftsfeld prädestiniert, die neue Kultur der Computerexperimente vor Ort in den Forschungsinstituten der Klimamodellierer zu untersuchen. War die Astronomie die Leitdisziplin des Umbruchs von der mittelalterlichen zur neuzeitlichen Wissenschaft, so stellt die Klimaforschung die Leitdisziplin in den sich aktuell entwickelnden Simulationswissenschaften dar.

Forschungsobjekt Atmosphäre

„Im Laboratorium des Meteorologen, in der uns umgebenden Atmosphäre,“ schreibt August Schmauß 1942 in seinem Buch *Das Problem*

der Wettervorhersage, „ist jedes Element in dauernder Veränderung; es gibt immer neue Bilder, wie in einem Kaleidoskop, das uns mit jeder Drehung einen neuen Anblick verschafft. Der Vergleich ist noch zu günstig, denn im Kaleidoskop sind wenigstens die einzelnen Farbgläschen voneinander unabhängig; im meteorologischen Kaleidoskop aber ändern die Teilstücke auch noch ihre Eigenschaften bei der Bewegung“ (Schmauß 1942: 3). Die Aufgabe des Meteorologen ist es daher, dieses Wechselspiel der atmosphärischen Zustände und der daraus resultierenden Wetter- und Witterungsphänomene zu erforschen, zu verstehen und schließlich vorherzusagen. Doch die Aufgabe wird noch komplizierter, wenn man den Blickwinkel auf dieses Wechselspiel der Variablen verändert und sich von den erlebbaren Wetter- und Witterungserfahrungen löst, um langfristige und globale Veränderungen zu studieren. Seit es möglich ist, globale Messdaten der Atmosphäre zu erheben und langfristige Messreihen zu rekonstruieren, zeugt die Zweiteilung der Meteorologie in Wetterkunde und Klimaforschung von diesem neuen Blickwinkel.¹ Mit den aktuellen Debatten um den von Menschen verursachten Klimawandel steht die Meteorologie vor einer weiteren Verkomplizierung ihrer Aufgabe, denn sie hat nun auch die sich verändernden klimatischen Faktoren auf aktuelle Wetterphänomene zu berücksichtigen.

Dieses zunehmend komplexe meteorologische Kaleidoskop zeigt sich im epistemischen Wandel des Forschungsgegenstandes der Meteorologie während der letzten Jahrhunderte. Zu Beginn stand die kosmologisch-geometrische Sicht auf meteorologische Phänomene, die auf das 340 v. Chr. von Aristoteles verfasste Werk *Meteorologica* zurückgeht. Aristoteles diskutierte Erscheinungen wie Wirbelwinde, Erdbeben oder Kometen und gliederte diese in Empedokles kosmologisches System der vier Elemente ein. Dazu teilte er – beginnend mit der Erde, gefolgt von Luft, Wasser und Feuer – den Kosmos in vier Sphären auf (vgl. Aristoteles 1970). Diese Eingliederung der Meteorologie in ein kosmologisches System hielt sich bis ins Mittelalter. El-Kazwini, ein arabischer Gelehrter des 13. Jahrhunderts, ordnete in seiner *Kosmographie* den Himmelsphären bestimmte Temperatureigenschaften zu:

„Die Luft ist ein einfacher Körper, dessen natürliche Beschaffenheit darin besteht, dass er heiß und feucht, durchsichtig und fein und in steter Bewegung nach der Stelle ist, die unterhalb der Feuersphäre und oberhalb der Wassersphä-

1 Paläoklimadaten der letzten Jahrhunderte bis Jahrtausende werden aus Proxy-Daten durch Analyse von Eisbohrkernen, Sedimentablagerungen oder fossilen Materialien rekonstruiert. Diese Datenarchäologie des Klimas gibt lediglich Auskunft über die lokalen Wetterbedingungen am Fundort und lässt daher nur bedingt Rückschlüsse auf das Klima vergangener Epochen zu.

re liegt. Man behauptet, die Tiefe des Himmels lasse sich in drei Abtheilungen zerlegen, deren erste in der Nähe der Mondsphäre, deren zweite nahe der Oberfläche des Wassers oder der Erde und deren letzte das Dazwischenliegende sei. Die am Mondhimmel befindliche Luft ist Feuer von äußerster Hitze [...] das in der Mitte liegende ist äußerst kalt [...] das der Erde Naheliegende endlich ist an einem Orte gemäßigt, an einem anderen weniger und heißt die sanfte Luft“ (El-Kazwini 1904: 127).

Die meteorologische Kenntnis jener Zeit basierte auf direkt erlebbaren Wettererscheinungen wie Stürme, Niederschläge, Wolkenformationen, Temperaturveränderungen. Informationen zu klimatischen Unterschieden polarer und tropischer Witterungen, unterschiedliche Jahresgänge und regelmäßige Winde wurden durch Reiseberichte überliefert.² Das Medium, in welchem sich diese meteorologischen Erscheinungen ereignen, bezeichnete man als Luftkörper der Erde, als Atmosphäre – griechisch: *atmos* (Dunst, Dampf) und *spharia* (Kugel) – oder als Luftmeer (vgl. Humboldt 1858). Über die Beschaffenheit und Bewegungsursache dieses Luftmeeres wurden zahlreiche Spekulationen angestellt. So wird in der Schrift von El-Kazwini die Ursache der Bewegung der sanften Luft, die wir als Winde erleben, durch ihr Hin- und Herwogen erklärt, ähnlich dem Wellenschlag des Meeres. Wobei das Wogen durch den Aufstieg warmer Luft, deren Abkühlung in der mittleren Sphäre und dem dadurch verursachten Herabsinken erklärt wird. El-Kazwini verweist auf die Sonneneinstrahlung als Ursache der Erwärmung und Bewegung der Luft. Diese Erklärung mutet im Unterschied zum kosmologischen Gesamtrahmen fast modern an. Sie erinnert an Edmond Halleys 1686 publizierte Entdeckung, dass niedrigere Breitengrade mehr solare Einstrahlung erhalten als höhere und dass der daraus resultierende Temperaturgradient den Motor der atmosphärischen Zirkulation darstellt (vgl. Halley 1686). Die unterschiedliche Erwärmung der Luft führt zur Ausdehnung und Druckveränderung und damit zur Zirkulation. Halley war damit der Erste, der nach strikt physikalischen Ursachen dieser Bewegung forschte, und lange Zeit galt die Druckveränderung aufgrund von unterschiedlichen Temperatureinstrahlungen als einzige Bewegungsursache der Winde. Erst 1735 brachte

2 „Während die Begleiter des Columbus vor der Beständigkeit des Passates erschrecken, dessen unveränderte Richtung ihnen jeden Rückweg zu versperren schien, nannten die spanischen Matrosen schon zu Don Ulloas Zeiten dieselben tropischen Gewässer ‚das Meer der Damen‘, weil die Schifffahrt dort so leicht sei, dass ein Mädchen das Steuer führen könne [...] da der stetige Wind sie doch sicher an das Ziel ihrer Reise nach den Philippinen führe. Der Name ‚Trade-Winds‘, welchen die Engländer dem Passat gegeben, könnte aber auch mit vollem Recht den Monsoons oder Moussons beigelegt werden“ (Dove 1837: 243).

George Hadley eine weitere Kraft ins Spiel, als er die Rotation der Erde als Ursache mitdachte (vgl. Hadley 1735). Doch sowohl Halley wie Hadley hatten die regelmäßigen Strömungsverhältnisse der Tropen vor Augen. Die sehr viel komplizierteren Windverhältnisse der gemäßigten Breiten konnten sie damit nicht erklären. „Alle Physiker, welche eine Theorie der Winde zu geben versucht haben,“ schreibt Heinrich Dove 1837, „sind bei der Erörterung der regelmässigen Erscheinungen unter den Tropen stehen geblieben, welches ihnen gewiss nicht verdacht werden kann, da es passend ist, in einer sehr verwickelten Aufgabe den einfachsten Fall zuerst zu betrachten“ (Dove 1837: 124). Dove hingegen wollte eine Begründung der Strömungsverhältnisse geben, die nachweist, „dass die Erscheinung der Passate, der Moussons und die verwickelten Windverhältnisse der gemäßigten und kalten Zonen nothwendige und einfache Folgen derselben physikalischen Grundbestimmungen sind“ (Dove 1837: 124, 125). Dove erklärt aus dem Gradienten der Rotationsgeschwindigkeit die verschiedenen Windmuster der Regionen:

„Die Rotationsgeschwindigkeit der einzelnen Punkte der Oberfläche der Erde verhält sich wie die Halbmesser der Parallelkreise, unter welchen sie liegen, sie nimmt also zu von den Polen, wo sie Null ist, bis zum Äquator. Im Ruhezustand nimmt die Luft Theil an der Drehungsgeschwindigkeit des Ortes, über welchen sie sich befindet. [...] Wird aber die Luft durch irgendeine Ursache von den Polen nach dem Äquator getrieben, so kommt sie von Orten, deren Rotationsgeschwindigkeit gering ist, nach Orten, an welchen sie größer ist. Die Luft dreht sich dann mit einer geringeren Geschwindigkeit nach Osten, als die Orte, mit welchen sie in Berührung kommt [...] Daraus folgt: auf der nördlichen Halbkugel gehen Winde, welche als Nordwinde entstehen, bei den allmählichen Fortrücken durch NO immer mehr in Ost über (Dove 1837: 125).

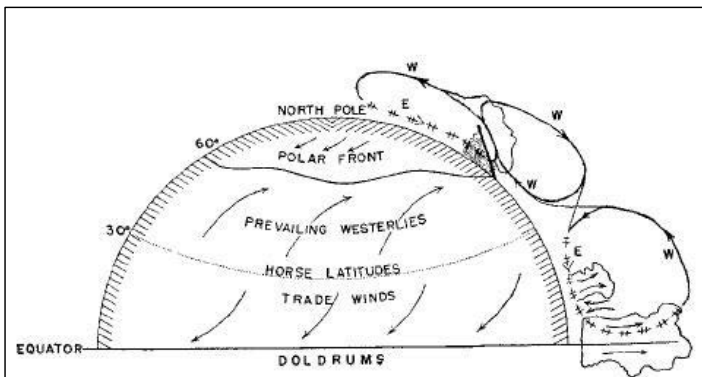


Abbildung 7: Großräumige Zirkulationsmuster (Lewis 2000: 96)

Auf diese Weise entstand ein erstes konzeptionelles Modell der Atmosphäre und ihrer großräumigen Zirkulationsmuster, wie in Abbildung 7 dargestellt. Dieses Modell wurde 1858 von William Ferrel komplettiert, indem er die Coriolis Kraft auf die Atmosphäre anwandte, also die Ablenkung eines Partikels durch seine Beschleunigung, hervorgerufen durch die Erdrotation. Diese Ablenkung, so stellte Ferrel fest, gehe in der nördlichen Hemisphäre nach rechts, in der südlichen nach links. „With this ‚new force‘ taken into account, the earth’s atmosphere generated three circulation cells and oblique wind in mid-latitudes with high velocities from the west. Moreover, high pressure at the poles which would be expected because of low temperature was reversed to low pressure by the excessive centrifugal force of the whirling winds. Conversely, high pressure was generated near the tropics. Ferrel’s theoretical results, which Cleveland Abbe called the *principia meteorologica*, were in accordance with the latest observations“ (Fleming 2002: 210).

Parallel zu diesen empirisch motivierten Untersuchungen der atmosphärischen Strömungen beschäftigte sich die Hydrodynamik mit dem Bewegungsverhalten von Gasen und Flüssigkeiten. Allerdings behandelten die hydrodynamischen Konzepte Strömungen in idealisierten, also inkompressiblen und reibungsfreien Fluiden. Basierend auf Isaac Newtons zweitem Axiom hatte Leonhard Euler 1755 die grundlegende Bewegungsgleichung für Strömungsprozesse in idealisierten Fluiden formuliert. 1822 fügte Claude M. Navier einen weiteren Term hinzu, der Eulers Gleichung in eine Beschreibung für viskose Fluide überführte. Viskosität beschreibt die innere Reibung eines Fluids, die von dünn- bis zähflüssig reichen kann. Unabhängig von Navier formulierte George Stokes 1845 Eulers Gleichungen ebenfalls für viskose Fluide um. Die Navier-Stokes-Gleichungen werden bis heute verwendet, um die Änderung des Betrags und der Richtung der Geschwindigkeit eines Fluidelements gewisser Masse in Abhängigkeit von den einwirkenden Kräften wie Druck, Schwerkraft und Reibung mathematisch zu formulieren. Doch die Gleichungen sind zu komplex, als dass man sie für konkrete Probleme wie die Strömungsverhältnisse der Atmosphäre anwenden konnte. Daher musste man auf die einfacheren, aber idealisierten Bedingungen zurückgreifen. Das Problem der einfacheren Konzepte war jedoch, dass sie die Entstehung von Turbulenzen und Wirbeln in idealisierten Fluiden nicht erklären konnten. Beides spielt jedoch für jedes praktische Strömungsproblem eine wichtige Rolle. Zwar postulierte Hermann von Helmholtz 1858, dass auch in idealisierten Fluiden Wirbel existieren können. Doch diese mussten als vorhanden angenommen werden und konnten weder vergehen, noch entstehen (vgl. Helmholtz 1858). Dieses Postulat war für die Meteorologie, die es permanent mit

dem Entstehen und Vergehen von Luftwirbeln – kleinen lokalen Verwirbelungen wie Windhosen bis hin zu den großen globalen Zirkulationsprozessen – zu tun hatte, nicht nur unbrauchbar. Es führte auch zu eigenartigen Schlussfolgerungen wie die, dass Wirbel in universalen Fluiden wie dem Äther „as permanent as the solid hard atoms assumed by Lucretius’, [as] Kelvin wrote to Helmholtz in a letter in 1867“ seien (Eckert 2006: 20).

Synoptische Wetterkarten

Um sich ein Bild der tatsächlichen Strömungsverhältnisse zu machen, behelfen sich Meteorologen daher mit synoptischen Klima- und Wetterkarten. In diese Karten wurden Messdaten für einen bestimmten Zeitpunkt zusammengetragen und Messungen selben Werts durch Isolinien miteinander verbunden.³ Bereits 1817 nutzte Alexander von Humboldt dieses Verfahren für Temperaturverteilungen und zeichnete eine erste Isothermenkarte. Ab 1863 trug Urban Le Verrier die Luftdruckverteilung in die täglichen Wetterkarten ein. Dabei verband er Orte gleichen Luftdrucks mit Linien, den Isobaren. Diese Karten lieferten eine Zusammenschau klima- oder wetterrelevanter Zustände (Synopsis). Bis zur Erfindung der Telegrafie konnten solche Wetterkarten jedoch erst Monate nach den eigentlichen Messungen hergestellt werden, nachdem die nötigen Daten in meteorologischen Jahrbüchern publiziert waren. Mit

3 Erste, für die Meteorologie wichtige Messinstrumente waren das 1597 von Galileo Galilei erfundene Wasserthermometer und das 1714 von Daniel Fahrenheit weiterentwickelte Quecksilberthermometer samt Temperaturskala (vgl. Fahrenheit 1714). Hinzu kamen das 1643 von Evangelista Torricelli erfundene Barometer zur Luftdruckbestimmung (vgl. Torricelli 1644) sowie die Entwicklung von Hygrometern zur Messung der Luftfeuchte. Mit diesen Instrumenten wurden ab Mitte des 17. Jahrhunderts vereinzelt Messreihen vor Ort durchgeführt und später durch Messung der Windrichtung und -stärke sowie der Niederschlagsmenge ergänzt. Es wurde jedoch deutlich, dass lokale Messungen mit nicht normierten Instrumenten nicht genügten. Bereits 1667 präsentierte Robert Hooke seine *Method for Making a History of the Weather* der Royal Society in London, deren Ziel die Normierung der Messungen war (vgl. Hooke 1667; Flemming 2002). Ab 1781 nahm die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft (Societas Meteorologica Palatina) erstmals weltweit synchrone Messungen vor. Neununddreißig Stationen vom Ural bis Nordamerika führten mit baugleichen Instrumenten zur Mannheimer Stunde um 7, 14 und 21 Uhr Messungen durch und definierten damit einen bis heute gültigen Standard der meteorologischen Messung (vgl. Wege, Winkler 2005). Ende des 19. Jahrhunderts gab es in Europa bereits ein gut ausgebautes Netz an Wettermessstationen und die Resultate wurden telegraphisch weitergegeben.

der Einführung der Telegrafie verbesserte sich die Situation erheblich, denn nun konnten Messwerte schnell und weltweit ausgetauscht werden. „Zum erstenmal wurde der Draht auf der Londoner Weltausstellung 1851 in den Dienst der Meteorologie gestellt, wo man, um die Anwendung der neuen Erfindung zu zeigen, täglich eine, wenn auch bescheidene Wetterkarte geben konnte“ (Schmauß 1942: 40).⁴

Die Synopsis der Beobachtungen war möglich, weil eine neue Darstellung der Daten gefunden worden war. Indem einzelne Messwerte zu Isolinien zusammengefasst wurden, machten sie das Muster der Zustände aktueller Wetterlagen sichtbar. Auf Basis von Erfahrungswissen über ähnliche Wetterlagen und Verteilungsmuster versuchten Meteorologen dann, die weitere Entwicklung des Wetters abzuschätzen. „Der Gewinn aus solchen Verbesserungen kommt aber nur langsam und allmählich,“ schreibt Nils Ekholm 1904, „denn die benützten Methoden sind ja rein empirisch, indem nur durch Sammeln und Vergleichung ähnlicher Fälle ein Fortschritt der Prognosekunst möglich ist. Der berühmte englische Meteorologe Clement Ley schlug ja einst vor, viele tausende von Wetterkarten systematisch zu ordnen, um sie als eine Art Wetter-Wörterbuch zu verwenden. [...] Jede Prognose sollte demnach nur oder doch hauptsächlich in der Angabe einer bestimmten Nummer des Wetter-Wörterbuches bestehen“ (Ekholm 1904: 346, 347). Ein solches Wörterbuch des Wetters für gemäßigte Breiten zu erstellen, erwies sich als schwierig. Denn das Charakteristische der Wetterlagen gemäßigter Breiten ist ihre Veränderlichkeit. Im Unterschied zu den kontinuierlichen Prozessen in den Tropen, zeichnet sich das Wetter in gemäßigten Breiten durch diskontinuierliche Austauschvorgänge von Kälte- und Wärmewellen aus.

Um dennoch Vorhersagen über zukünftige Wetterentwicklungen machen zu können, führten Meteorologen Vergleiche zwischen zwei synoptischen Karten durch, indem sie die beiden Karten auf ein transparentes Papier übertrugen und übereinander legten. Durch die sich verändernden Isolinien wurden so die Veränderung der Wetterlagen sichtbar und es zeigten sich die, „über die Wetterkarte hin und her wandernden Hochs und Tiefs“ (Bjerknes 1938: 50). Verschoob man diese Hochs und Tiefs entsprechend dem bisherigen Muster weiter, so ergab sich eine Prognose für die kommenden Stunden. Dabei durfte das „Intervall zwi-

4 Die Londoner Wetterkarten waren jedoch nur Demonstrationen der Nützlichkeit telegrafierter Informationen. Erst die Einrichtung der telegraphischen Wetterdienste in den 1890er Jahren und Messungen zu festgelegten Zeiten – in Deutschland damals durch die Seewarte Hamburg – lieferten die nötigen Zustandswerte der Atmosphäre, um aussagekräftigere Wetterkarten zu erstellen.

schen zwei sukzessiven synoptischen Karten nicht größer als 12 Stunden sein“ (Ekholm 1904: 349), wollte man einigermaßen aussagekräftige Prognosen erzielen. Allerdings wäre es vorteilhafter gewesen, doch messtechnisch 1904 noch nicht praktikierbar, „das Intervall auf 6 Stunden zu reduzieren, damit die Kontinuität deutlich bemerkbar sei und somit eine nach regulären Methoden auszuführende Interpolation und Extrapolation [als Vorhersage in die Zukunft] möglich sei“ (Ekholm 1904: 349).

Die synoptischen Wetterkarten zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeigten jedoch nur unvollständige Momentaufnahmen eines hoch dynamischen Geschehens, dessen zukünftige Entwicklung unter diesen Bedingungen nicht wirklich vorhersagbar war. Zum einen gab es nur Daten bodennaher Messungen, zum anderen waren die Beobachtungsnetze noch nicht ausreichend dicht und wiesen große Lücken über den Meeren oder Kontinenten wie Afrika auf. Die Analyse aufeinander folgender, synoptischer Karten ‚simulierte‘ zwar ein dynamisches Bild meteorologischer Ereignisse in der Atmosphäre. Doch den Meteorologen wurde bald klar, dass diese, sich im Zweidimensionalen darstellenden Ereignisse – sowohl auf der Fläche der Karte wie auch auf bodennaher Ebene der Messungen – nur ein Schnitt durch Vorgänge sind, die sich im Dreidimensionalen abspielen. Man erkannte, „daß Witterungsänderungen meistens mit einer Änderung des ‚Luftkörpers‘ einhergehen. Wenn z.B. nach längerer Schönwetterlage von Westen ein Tief heranrückt, wird die ‚kontinentale Luft‘, die wir bis dahin geatmet haben, ersetzt durch ‚maritime Luft‘, die ihre vom Ozean stammenden Eigenschaften um so unverfälschter mitbringt, je rascher die Ablösung erfolgte“ (Schmauß 1942: 2,3). Diese Luftkörper sind im Grunde nichts anderes als Binnenstrukturen innerhalb der drei globalen Zirkulationsmuster, die bereits von Halley, Hadley, Dove und Ferrel beschrieben wurden. Es bedurfte also eines theoretischen Verständnisses der Atmosphäre als dreidimensionales Objekt und es war notwendig, „die synoptischen Beobachtungen vom zweidimensionalen Raum der Erdoberfläche auf den dreidimensionalen Raum, das Luftmeer“ auszudehnen (Nimführ 1904: 409). Erst im Dreidimensionalen zeigen sich die Ursachen der Veränderungen der Luftmassen. Dazu braucht es ein räumliches, möglichst hoch aufgelöstes Messbild der Atmosphäre. Doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts standen nur Ballone und Drachen zur Verfügung, um die Zustände der höheren Luftschichten zu erforschen.⁵ Erst später kamen Luftschiffe und Flugzeuge für aerologische Messungen hinzu.

5 „Wir haben gegenwärtig in dem Drachen und dem Drachenballon zwei neue Forschungsmittel, die es uns ermöglichen, jederzeit bis zu Höhen von 2000 m und darüber die Werte der Wetterfaktoren in der freien Atmosphä-

Eine wichtige Theorie der Luftkörper für die gemäßigten Breiten entstand 1917 mit der Polarfronttheorie von Vilhelm Bjerknes und seines Sohnes Jakob. Die Polarfront markiert, wie in Abbildung 8 dargestellt, die Grenze der polaren Luftmassen, die an Stellen geringen Widerstandes in Form von Kälteeinbrüchen in die gemäßigten Breiten vordringen und zwischen kalten und warmen Luftmassen Tiefdruckgebiete (Zyklonen) verursachen. Die Schematisierung der Zyklonen sowie die Voraussage des dazugehörigen Wetters wurden durch Messungen sowie durch die Beobachtungen struktureller Indikatoren für Veränderungen in den Luftmassen gewonnen. Solche Indikatoren sind Wolken, welche die Bewegungen warmer und kalter Luftmassen zueinander anzeigen. Die Ausarbeitung der theoretischen Grundlagen, die Bjerknes im norwegischen Bergen mit seinen Kollegen vorantrieb, ermöglichte es, bessere Vorhersagen zu erzielen. Rückblickend auf seine Polarfronttheorie formuliert er 1938 die Fortschritte als Resultat der Synopsis:

„Durch die jetzt immer schärfere Wetterkartenanalyse traten die früher nur als Ausnahmereischeinungen beobachteten Diskontinuitätslinien als tägliche Gäste auf den Wetterkarten auf. In dieser Weise wurden allmählich die jetzt so bekannten Tatsachen der ‚Polarfrontmeteorologie‘ oder der ‚Luftmassenmeteorologie‘ gefunden. Man lernte die großen atmosphärischen Diskontinuitätsflächen kennen, die sich, je nach ihrer Bewegungsrichtung, als ‚Kaltfronten‘ oder ‚Warmfronten‘ am Erdboden zu erkennen gaben. Es wurde beobachtet, wie die Zyklonen mit einer wellenförmigen Vertiefung in einer Diskontinuitätsfläche angingen. Die Vertiefung nahm zu, mit dem Erfolg, daß die ursprüngliche Welle durch das Bergeronsche Okklusionsstadium sich allmählich in einen Horizontalwirbel umbildete. Das Paradoxon von dem Wellenursprung der Zyklonen war aufgeklärt, und die – schwierige – Ausarbeitung der mathematischen Theorie der Zyklonenbildung konnte beginnen. Und schließlich: die praktische Wettervorhersage, die sich auf dieser Grundlage entwickelte, verlief sozusagen von selbst nach dem von Anfang an aufgestellten Programm: die Ortsveränderungen der bewegten Luftmassen zu bestimmen, und die Zustände, in denen sie anlagen“ (Bjerknes 1938: 58, 59). „In den Händen solcher Forscher hat sich die moderne Wetterkarte zu einem grundlegenden – immateriellen – Instrument der Physik der Atmosphäre entwickelt, entsprechend dem materiellen Instrumenten der Laborphysik“ (Bjerknes 1938: 61).

re zu bestimmen. Unter günstigen Umständen kann man, wie die Erfahrung gezeigt hat, schon bis zu Höhen von 5000 m mittelst Drachen Registrierapparate hochbringen“ (Nimführ 1904: 411).

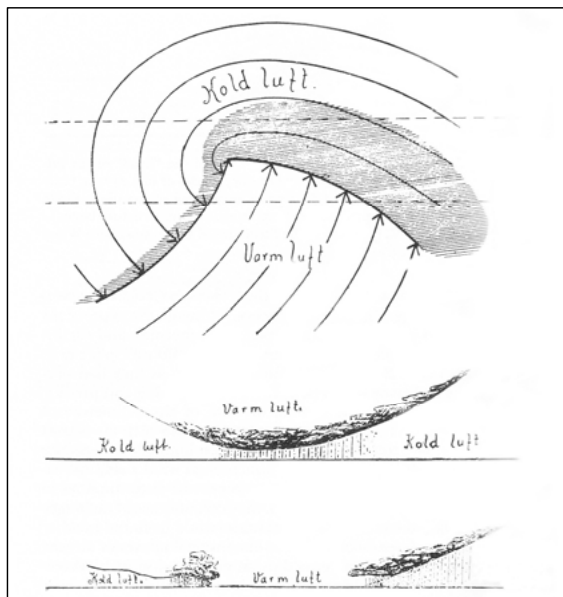


Abbildung 8: Polarfronttheorie (Bjerknes 1919: 128)

Die Wetterkarte als Erkenntnisinstrument markierte den Beginn dreidimensionaler Modelle atmosphärischer Prozesse, auch wenn die Dreidimensionalität sich erst in einzelnen Querschnitten vertikaler Prozesse zeigte, die Messdaten noch dürrig und Modelle noch einfach waren. Dennoch bereite-te diese Entwicklung den weiteren Weg der Meteorologie zu einer dynamischen Meteorologie und einer Physik der Atmosphäre vor.⁶

Vilhelm Bjerknes Konzept einer Physik der Atmosphäre

Obwohl Bjerknes mit der Polarfronttheorie, die sich ab den 1920er Jahren als äußerst erfolgreiche Methode der Wettervorhersage erwies, die

6 Darüber hinaus verbanden die synoptischen Wetterkarten Wetter- und Klimaforschung in neuer Weise miteinander. „Der Wetterdienst hat erkennen lassen, daß die Atmosphäre gewisse konservative Eigenschaften hat, so daß wir gelegentlich an den Bedingungen, die über ganz anderen Gebieten der Erde Geltung haben, teilnehmen; die Klimatologie hat eine Veredelung erfahren, indem man neben den gewohnten und auch notwendigen Mitteln einer Pentade, einer Woche, eines Monats die mittleren Temperaturen, Feuchtigkeiten usw. bestimmter Luftkörper zu bestimmten Zeiten des Jahres berechnen mußte“ (Schmauß 1942: 2).

Meteorologie als Praxis vorangebracht hatte, entsprach diese angewandte Prognostik nicht seinem ursprünglichen Programm einer rationellen Wettervorhersage basierend auf der Meteorologie als exakter Wissenschaft. 1913 hatte er anlässlich seiner Antrittsvorlesung als Professor für Geophysik an der Universität Leipzig sein Ziel, eine Physik der Atmosphäre zu schaffen, formuliert. „Die Physik der Atmosphäre behandelt denselben Gegenstand wie die Meteorologie. Deshalb darf man aber nicht diese Wissenschaften miteinander identifizieren. Der Unterschied wird dadurch gekennzeichnet, daß man die Physik zu den sogenannten exakten Wissenschaften rechnet, während man versucht sein könnte, die Meteorologie als Beispiel einer höchst inexakten Wissenschaft anzuführen. Die Meteorologie wird erst in dem Maße exakt, in dem sie sich zu einer Physik der Atmosphäre wandelt“ (Bjerknes 1913: 4).

Diese Physik der Atmosphäre gründet in den physikalischen Konzepten von Halley, Hadley, Dove und Ferrel sowie in den hydrodynamischen Theorien von Euler, Navier, Stokes, Helmholtz, Kelvin und anderen Forschern. Bjerknes selbst hatte Ende der 1890er Jahre den entscheidenden Durchbruch erzielt, um die Hydrodynamik für meteorologische Anwendungen fruchtbar zu machen. Bei seinen Bemühungen, die idealisierten Gleichungen für kompressible Fluide zu erweitern, stieß er auf mathematische Probleme.⁷ „Attractive and repulsive phenomena between the fluid bodies seemed to occur with an accompanying production of vortices in the boundary layer between the fluid bodies and the surrounding fluid. This result contradicted the well-established theorems of Helmholtz and Lord Kelvin which claimed vortex motions and circulations in frictionless, incompressible fluids are conserved“ (Friedman 1989: 19). Indem Bjerknes die Annahmen von Helmholtz und Kelvin für kompressible Fluide in Frage stellte, postulierte er sein allgemeines Zirkulationstheorem. Dieses Theorem besagt, dass die Dichte eines Fluids von verschiedenen Variablen wie Feuchtigkeit, Temperatur als auch Druck bestimmt sein konnte, oder mathematisch formuliert: Die Dichte war nicht nur eine Funktion des Drucks, sondern auch anderer Faktoren (vgl. Bjerknes 1898, 1900). Als er im März 1897 und im Februar 1898 sein Zirkulationstheorem in der Physikalischen Gesellschaft in Stock-

7 Es war ein Glücksfall für die Meteorologie, als sich Vilhelm Bjerknes, von Hause aus Physiker, zu Beginn der 1890er Jahre mit den hydrodynamischen Gleichungen beschäftigte. Sein Ziel war es, die hydrodynamischen Gleichungen für die Elektrodynamik fruchtbar zu machen. Er hatte 1890 und 1891 Heinrich Hertz bei seinen elektromagnetischen Experimenten assistiert und wurde 1895 als Professor für Angewandte Mechanik und Mathematische Physik nach Stockholm gerufen.

holm präsentierte, erkannten die dort anwesenden Meteorologen Svante Arrhenius und Nils Ekholm sofort die Bedeutung von Bjerknes Konzept für die Meteorologie. Denn damit war es möglich geworden, das Entstehen und Vergehen von Strömungen in kompressiblen Fluiden, wie sie in der Atmosphäre vorkommen, zu erklären und mathematisch konzeptuell handhabbar zu machen. Bereits im Frühjahr 1900 wurden Bjerknes revolutionäre Ideen über *Das dynamische Prinzip der Cirkulationsbewegung in der Atmosphäre* in der Meteorologischen Zeitschrift veröffentlicht. Er leitet seinen Artikel wie folgt ein:

„Die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen erhalten ohne Zweifel den Schlüssel zu dem Verständnis atmosphärischer Bewegungen. Man begegnet aber der grossen Schwierigkeit, dass man die Integrale dieser Gleichungen nicht darstellen kann für die in der Atmosphäre vorliegenden complicirten Verhältnisse. Um deshalb in der Meteorologie rationelle dynamische Methoden einzuführen, muss man versuchen, einen solchen Weg einzuschlagen, dass man die in diesen Gleichungen enthaltenen dynamischen Principien in Verwendung bringt, ohne nöthig zu haben, die Gleichungen integrieren zu müssen. Dabei wird man kaum einen besseren Weg einschlagen können als denjenigen, welchen v. Helmholtz und Lord Kelvin betreten haben, [...] aber unter der Voraussetzung von Eigenschaften, die denjenigen der natürlichen Flüssigkeiten näher kommen, um [...] die Gesetze der Bildung und der Vernichtung der atmosphärischen Cirkulations- und Wirbelbewegungen zu erhalten. [...] 1. Man geht mit v. Helmholtz und Lord Kelvin von den Bewegungsgleichungen für reibungslose Flüssigkeiten aus, führt aber im Verlaufe der Rechnung keine beschränkenden Voraussetzungen in Bezug auf die Dichtigkeit der Flüssigkeit ein. 2. Man entwickelt die entsprechenden Sätze, indem man von den Bewegungsgleichungen der reibenden Flüssigkeiten ausgeht. [...] 3. Man bezieht alle Sätze auf ein rotierendes Koordinatensystem, um in den Anwendungen nur die Cirkulations- oder Wirbelbewegungen relativ zu der rotierenden Erde betrachten zu brauchen“ (Bjerknes 1900: 12, 13).

Als Bewegungsursache werden in Bjerknes mathematischem Modell die temperaturbedingten Dichteunterschiede berücksichtigt, welche darüber hinaus durch die Rotation der Erde sowie durch die Reibung der Partikel modifiziert werden. Bjerknes erläuterte in seinem umfangreichen Artikel ausführlich, wie er das Konzept von Helmholtz und Kelvin mathematisch erweitert und wie er die Dynamik des von ihm konzipierten Modells geometrisch konstruiert, um letztendlich berechenbare Resultate zu erhalten. Dazu stellte er sich Flächen gleichen Drucks (isobare Flächen) mit einem senkrecht zur isobaren Fläche stehenden Gradienten abnehmenden Drucks vor. Analog postuliert er Flächen gleichen spezifischen Volumens (isostere Flächen) mit einem Beweglichkeitsvektor der sich

verändernden spezifischen Volumen, da die Beweglichkeit mit wachsendem spezifischem Volumen zunimmt.⁸ Er stellte fest, dass isobare wie auch isostere Flächen entweder gegen sich selbst zurücklaufen und Kurven bilden oder an der Grenzfläche der Flüssigkeit enden, nie aber in der Flüssigkeit abrupt abbrechen. Außerdem können sich isobare Flächen unterschiedlichen Drucks nicht schneiden. Selbiges gilt für isostere Flächen. Wäre wie bei Helmholtz die Dichte nur eine Funktion des Drucks, dann würden sich auch die isobaren und isosteren Flächen nie schneiden. In Bjerknes Modell ist die Dichte bzw. das spezifische Volumen der Luft jedoch nicht nur eine Funktion des Drucks, sondern auch der Temperatur und, allerdings vernachlässigbar, der Feuchtigkeit. Daher können sich die isobaren und isosteren Flächen schneiden und isobare-isostere Röhren bilden. „Vorausgesetzt, dass wir [...] Einheiten passender Grössenordnungen benutzen, werden wir die entsprechenden als infinitesimal aufzufassenden Einheitsröhren Solenoide nennen. Die Querschnitte der grösseren isobare-isosteren Röhren haben die Form von krummlinigen Vierecken, die Querschnitte der Solenoide sind gradlinige Parallelogramme“ (Bjerknes 1900: 103).⁹ Der Vorteil dieser Einheitsröhren oder Solenoide ist, dass sich mit ihnen nun die dynamischen Bedingungen einer Zirkulation geometrisch untersuchen lassen. Bjerknes zeigt, dass der Zuwachs der Zirkulation in einer Flüssigkeit der Anzahl der Solenoide entspricht, die durch die geschlossene Kurve von Flüssigkeitspartikeln umschlossen wird.¹⁰ „Zu beachten ist dann, dass wo die

-
- 8 „Die Beschleunigung, welche der Gradient einem Partikelchen der Flüssigkeit mittheilt, hängt von der Trägheit, das heisst von der Dichte des Partikelchens ab: sie ist gleich dem Gradienten dividirt durch die Dichte; oder noch einfacher: sie ist gleich dem Gradienten multiplicirt mit dem specifischen Volumen k des betreffenden Flüssigkeitselements. Um die Vertheilung der auf dem Druck beruhenden Beschleunigung angeben zu können, genügt es deshalb, ausser der Druckvertheilung zugleich die Vertheilung des specifischen Volumens in der Flüssigkeit zu nennen“ (Bjerknes 1900: 102).
 - 9 Den Begriff Solenoide übernimmt Bjerknes aus der Elektrodynamik. Dort bezeichnet dieser einen elektromagnetischen Induktionsgenerator. Die Einheitsgröße ergibt sich aus der Wahl der Eins für Druckunterschiede der isobaren Flächen. „Durch die zweckmäßige Wahl der Einheit kann man dennoch immer erreichen, dass die isobaren Flächen hinlänglich nahe aneinander verlaufen, um in befriedigender Vollständigkeit die Druckvertheilung in der Flüssigkeit wiederzugeben“ (Bjerknes 1900: 102).
 - 10 Idealer Weise ergeben in einem genügend kleinen Teil der Flüssigkeit die Querschnitte der Solenoide ein System von kongruenten Parallelogrammen, d.h. der Druckgradient und der Beweglichkeitsvektor haben überall eine unveränderliche Größe und Richtung. Da aber das spezifische Volumen und damit die Beschleunigung der Flüssigkeitsteilchen von Punkt zu Punkt unterschiedlich sind, werden die Teilchen anfangen zu rotieren:

Temperatur hoch ist, das spezifische Volumen der Luft grösser ist, und wo die Temperatur niedrig ist, das spezifische Volumen kleiner ist, als man es nach dem Werth des Druckes erwartet. [...] Die isothermen Flächen müssen also von den isobaren abweichen, und zwar immer in der Weise, dass sie in den heißen Gegenden niedriger, in den kalten höher als die entsprechenden isobaren Flächen liegen. Die beiden Flächenschaaren müssen also einander nothwendig schneiden und Solenoide bilden, welche Cirkulationsbewegungen der Luft erzeugen“ (Bjerknes 1900: 145). Bei Kenntnis der tatsächlichen Druck- und Temperaturschwankungen, so Bjerknes, lässt sich auf diese Weise die Zirkulation berechnen. Da es ihm um eine rationelle dynamische Methode geht, welche die in den hydrodynamischen „Gleichungen enthaltenen dynamischen Principien in Verwendung bringt“ (Bjerknes 1900: 12), hofft er, diese Methode auch für die Wettervorhersage nutzen zu können. „Aus der Anzahl der Solenoide wird man schließen können, in wie weit der Wind in der nächsten Zukunft an Intensität zu- oder abnehmen wird. Alles wird zuletzt nur davon abhängen, ob man hinlänglich viele systematische Beobachtungen aus den höheren Luftschichten erhalten kann“ (Bjerknes 1900: 158).¹¹

Damit legte Bjerknes den Grundstein einer Physik der Atmosphäre. Doch erst mit seinem Konzept, das er in dem Artikel *Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik* im Januar 1904 vorstellt, beschreibt er die Physik der Atmosphäre, wie sie bis heute Grundlage der Meteorologie ist. Dabei appelliert Bjerknes an das deterministische Wissenschaftsverständnis wie es für die Physik als exakte Wissenschaft obligatorisch ist. „Wenn es sich so verhält, wie jeder naturwissenschaftlich denkende Mann glaubt, daß sich die späteren atmosphärischen Zustände gesetzmäßig aus den vorhergehenden entwickeln, so erkennt man, daß die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für eine rationelle Lösung des Prognoseproblems der Meteorologie die folgenden sind: 1. Man muß mit hinreichender Genauigkeit den Zustand der Atmosphäre zu einer gewissen Zeit kennen. 2. Man muß mit hinreichender Genauigkeit die Gesetze kennen, nach

geometrisch ist dies als Zirkulation der aus den Teilchen bestehenden geschlossenen Kurven dargestellt.

- 11 „Zuletzt wird die Theorie auch ihre Anwendbarkeit behalten, wenn man die Atmosphäre und das Meer zusammen als ein einziges flüssiges Medium betrachtet. Dies ist von grosser Bedeutung wegen der ausgedehnten Wechselwirkungen zwischen den Bewegungen der Luft und des Meeres“ (Bjerknes 1900: 158). Heutige Wetter- und Klimamodelle basieren auf der Hydrodynamik der Atmosphäre wie auch der Ozeane.

denen sich der eine atmosphärische Zustand aus dem anderen entwickelt“ (Bjerknes 1904: 1). Auch wenn Bjerknes dabei allzu optimistisch von einer „vollständigen Diagnose des Zustandes der Atmosphäre“ (Bjerknes 1904: 1) in näherer Zukunft ausging, so zeichnete er ein klares Bild der Gesetzmäßigkeiten atmosphärischer Prozesse, wie sie bis heute jedem Wetter- und Klimamodell zugrundeliegen:

„Die atmosphärischen Prozesse sind gemischte Vorgänge mechanischer und physikalischer Natur. Für jeden einzelnen dieser Vorgänge können wir nach mechanischen oder physikalischen Prinzipien eine oder mehrere mathematische Gleichungen aufstellen. Die genügende Kenntnis der Gesetze, nach welchen sich die atmosphärischen Prozesse entwickeln, haben wir, wenn wir in dieser Weise ebenso viele voneinander unabhängige Gleichungen aufschreiben können, als unbekannte Größen zu berechnen sind. Der Zustand der Atmosphäre zu einer beliebigen Zeit wird in meteorologischer Hinsicht bestimmt sein, wenn wir zu dieser Zeit in jedem Punkt die Geschwindigkeit, die Dichte, den Druck, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft berechnen können. Als Vektor wird die Geschwindigkeit durch drei skaläre Größen, die drei Geschwindigkeitskomponenten, dargestellt, und es handelt sich deshalb um die Berechnung von 7 unbekannten Größen“ (Bjerknes 1904: 2).

Um die sieben meteorologischen Variablen berechnen zu können, benötigt man die drei hydrodynamischen Bewegungsgleichungen, die Kontinuitätsgleichung der Erhaltung der Masse, die Zustandsgleichung der Atmosphäre sowie die beiden Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie. Die drei hydrodynamischen Bewegungsgleichungen sind „Differentialrelationen zwischen den drei Geschwindigkeitskomponenten, der Dichte und dem Druck. [...] Die Kontinuitätsgleichung, welche das Prinzip von der Erhaltung der Masse während der Bewegung ausspricht [...] ist wieder eine Differentialrelation und zwar zwischen den Geschwindigkeitskomponenten und der Dichte. [Ebenso] die Zustandsgleichung der atmosphärischen Luft, welche eine Relation in endlicher Form zwischen Dichte, dem Druck, der Temperatur und der Feuchtigkeit einer beliebigen Luftmasse ist“ (Bjerknes 1904: 2). Die beiden Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie lassen sich ebenfalls als Differentialgleichungen schreiben und geben an, wie sich die Energie und die Entropie einer Luftmasse durch die Zustandsänderungen in der Atmosphäre verändern.¹² Für die Berechnung dieser sieben Zustandsvariablen der At-

12 „Auch durch diese Gleichungen werden keine neuen Unbekannten in dem Probleme eingeführt, denn die Energie und Entropie drücken sich durch dieselben Veränderlichen aus, welche in der Zustandsgleichung eingehen und setzen die Änderungen dieser Größen mit der Änderung anderer, als bekannt anzusehenden Größen in Verbindung. Diese anderen Größen sind

mosphäre ergeben sich sieben, voneinander unabhängige Gleichungen. Alle Gleichungen, mit Ausnahme der Zustandsgleichung, sind partielle Differentialgleichungen. Das sich daraus zusammensetzende Gleichungssystem ist jedoch zu komplex, als dass es sich analytisch lösen ließe. Hier endete Bjerknes Optimismus, den er bezüglich der Möglichkeit flächendeckender Messungen der Atmosphäre in naher Zukunft hegte:

„Schon die Berechnung dreier Punkte, die sich nach einem so einfachen Gesetze wie dem Newtonischen gegenseitig beeinflussen, übersteigt bekanntlich weit die Hilfsmittel der heutigen mathematischen Analyse. Für die unter weit komplizierteren Wechselwirkungen vor sich gehenden Bewegungen sämtlicher Punkte der Atmosphäre ist dann selbstverständlich nichts zu hoffen. Die exakte analytische Lösung würde aber, selbst wenn wir sie aufschreiben könnten, auch nicht das geben, was wir brauchten. Denn um praktisch nützlich zu sein, muß die Lösung vor allem übersichtliche Form haben und deshalb unzählige Einzelheiten unbeachtet lassen, die in jede exakte Lösung eingehen würden. Die Vorhersage darf sich also nur mit Durchschnittsverhältnissen über größere Strecken und für längere Zeiten beschäftigen, sagen wir beispielsweise für Meridiangrad zu Meridiangrad und von Stunde zu Stunde, nicht aber von Millimeter zu Millimeter und von Sekunde zu Sekunde“ (Bjerknes 1904:2).

Bjerknes Einschätzung, dass man auf eine analytische Lösung der komplexen Wechselwirkungen des Vielteilchensystems der Atmosphäre nicht hoffen kann, trifft bis heute zu. Eine analytische Lösung gibt es nicht, und die Computersimulation stellt lediglich die numerische Approximation der unbekannten, analytischen Lösung für ein definiertes Raum-Zeitgitter dar. Allerdings trifft Bjerknes Vermutung, dass die Berücksichtigung zu vieler Einzelheiten ohne größeren Nutzen sei, nicht zu und lässt sich allein aus den beschränkten Berechnungsmethoden der damaligen Zeit erklären. Heutige Modelle verbessern sich gerade in ihrer Detailliertheit in Form höherer raumzeitlicher Auflösungen und subskaliger Parametrisierungen. Die computergestützten Rechenmethoden und Auswertungsmöglichkeiten erlauben es, aus der Masse an Einzeldaten Durchschnittsverhältnisse zu errechnen. Doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren die Meteorologen auf einige wenige Berechnun-

erstens die von der Luftmasse ausgeführte Arbeit, welche durch dieselben Veränderlichen bestimmt ist, die in den dynamischen Gleichungen eingehen, zweitens die von außen aufgenommenen oder die nach außen abgegebenen Wärmemengen, welche durch die physikalischen Daten über Ein- und Ausstrahlung sowie über die Erwärmung der Luft bei Berührung mit der Erde gegeben sein werden (Bjerknes 1904: 2).

gen per Hand angewiesen. Die Dynamik der Atmosphäre war noch nicht durch ihre Mechanik und Physik für einzelne Variablenpunkte auflösbar und berechenbar. Es fehlte nicht nur an Rechenkapazitäten und Messdaten, sondern an praktikablen Umsetzungskonzepten und messtechnischen Standardisierungen. Bjerknes selbst versuchte zwar ab 1913 als Direktor des geophysikalischen Instituts der Universität Leipzig seine rationelle dynamische Methode anzuwenden und mit Hilfe graphischer Rechenmethoden für Wettervorhersagen nutzbar zu machen. Bereits 1911 war ihm klar: „The development of proper graphical methods for performing these operations directly upon the charts will be of the same importance for the progress of dynamic meteorology and hydrography as the methods of graphical statistics and of graphical dynamics have been for the progress of technical sciences“ (Bjerknes 1911: 69). Doch aufgrund mangelnder Rechenkapazitäten musste er sein Konzept einer Physik der Atmosphäre mit qualitativen Methoden kombinieren oder gar durch solche ersetzen. „Ideally, he claimed [in 1919], the prognostic problem could be solved mathematically with the help of mechanics and thermodynamics; practical meteorological methods could perhaps be devised that qualitatively use the knowledge implicit in the mechanical and thermodynamical equations“ (Friedman 1989: 157).

Berechenbare Modelle der Atmosphäre

Bjerknes lieferte 1904 ein mathematisches Modell der Physik der Atmosphäre in Form eines Systems aus sieben Gleichungen für die sieben meteorologischen Variablen der Dichte, der Feuchtigkeit, des Drucks, der Temperatur sowie der Geschwindigkeit der Luft in drei Richtungen. Das Gleichungssystem beschreibt dabei den Zustand der Luftmassen (Dichte, Druck, Temperatur, Feuchte), ihre Bewegung (Geschwindigkeitskomponenten, Dichte, Druck), die Massenerhaltung während der Bewegung (Geschwindigkeitskomponenten, Dichte) sowie die Veränderung der Energie und Entropie der Zustandsänderungen der Luftmassen (Variablen im Zusammenhang mit der von den Luftmassen ausgeführten Arbeit sowie den aufgenommenen und abgegebenen Wärmemengen durch solare Ein- und Ausstrahlung und vom Boden aufgenommener Energie). Da dieses mathematische Modell sich analytisch nicht lösen lässt, bedarf es eines praktikablen Rechenschemas.¹³ Dazu muss das Ge-

13 Sein Programm einer Wettervorhersage, wie er es in der Bergen-Schule ab 1917 entwickelte, wich aus pragmatischen Gründen immer mehr von seinem 1904 formulierten Ansatz ab. Erst mit der Erfindung des Computers

samtproblem der rationellen Vorhersage, basierend auf diesem System der sieben Gleichungen, in Teilprobleme zerlegt werden, die dadurch rechnerisch handhabbar werden. „Zu rechnerischen Zwecken kann man die gleichzeitigen Variationen mehrerer Veränderlichen durch aufeinander folgende Variationen der einzelnen Veränderlichen oder einzelner Gruppen der Veränderlichen ersetzen. [...] Behält man die endlichen Intervalle bei, so kommt man auf die Annäherungsmethode der endlichen Differenzenrechnung“ (Bjerknes 1904: 4). Die Ausführung dieser Differenzenrechnung des Modells ist nichts anderes als die numerische Simulation gemäß eines schrittweise abarbeitbaren Schemas – ob per Hand oder ab den 1940er Jahren mit Hilfe automatischer Rechenmaschinen. Allerdings lässt sich das Gesamtproblem nicht in beliebiger Weise zerlegen. Bjerknes weist darauf hin, dass die Gruppierung der Veränderlichen erhalten bleiben muss. Das Resultat einer solchen Unterteilung müssen mathematisch und physikalisch wohldefinierte Teilprobleme sein, die „einer natürlichen Teilungslinie im Hauptproblem folgen. Eine solche Teilungslinie lässt sich auch angeben. Sie folgt der Grenzlinie zwischen den speziell dynamischen und den speziell physikalischen Prozessen, aus welchen die atmosphärischen Prozesse zusammengesetzt sind“ (Bjerknes 1904: 4). Dieser Grenzlinie folgend ergibt sich die Zerlegung in rein thermodynamische sowie hydrodynamische Teilprobleme, indem man das Schranier zwischen beiden Teilen – die Zustandsgleichung, welche die Dichte, den Druck, die Temperatur und die Feuchte der Luftmassen beschreibt – kappt. Würde man jedoch dabei aus Vereinfachungsgründen die Temperatur und Feuchtigkeit eliminieren – wie dies von den Hydrodynamikern vor Bjerknes Zirkulationstheorem gemacht wurde, um die thermodynamischen Prozesse nicht explizit berücksichtigen zu müssen – dann würde die Dichte nur vom Druck abhängen, wie in Helmholtz’ und Kelvins mathematischen Modellen. Doch die Physik der Atmosphäre erfordert gerade die Berücksichtigung dieser Variablen für eine realistische Formulierung des Vorhersageproblems. Daher schlägt Bjerknes vor, „anstatt die Temperatur und die Feuchtigkeit aus der Zustandsgleichung ganz verschwinden zu lassen, können wir sie aber für kürzere Zeitintervalle als gegebene Größen ansehen, mit Werten, welche entweder aus den Beobachtungen oder aus den vorhergehenden Rechnungen hervorgegangen sind. Ist das dynamische Problem für dieses Zeitintervall gelöst, so berechnet man nachher nach rein thermodynamischen Methoden neue Werte von Temperatur und Feuchtigkeit. Diese sieht man als gegebene Größen an, wenn man

rückte Bjerknes Konzept einer rationellen Wettervorhersage basierend auf Berechnungen wieder in greifbare Nähe.

das hydrodynamische Problem für das nächste Zeitintervall löst und so weiter“ (Bjerknes 1904: 5).

Die hydrodynamischen Gleichungen sind die eigentlichen prognostischen Gleichungen, da nur sie die Zeit als unabhängige Variable beinhalten. Für ihre Berechnung schlägt Bjerknes eine graphische Berechnungsmethode vor, indem für bestimmte Berechnungspunkte eine Prognose mit Hilfe der Parallelogrammkonstruktion ermittelt wird. Allerdings gilt es, die Beschränkungen der Bewegungsfreiheit dieser graphischen Verschiebungen durch die Kontinuitätsgleichung sowie Grenzbedingungen wie die Topographie des Bodens zu berücksichtigen. Auch wenn Bjerknes, wie er 1904 schrieb, „keine großen mathematischen Schwierigkeiten“ bei der graphischen Berechnung der Hydrodynamik erwartete, so weist er darauf hin, dass die unvollständige Kenntnis des Reibungswiderstandes der Luft eine empfindliche Lücke in der Kenntnis der atmosphärischen Zustände sei.¹⁴ Auch bezüglich der thermodynamischen Zustände, welche die Verteilung von Temperatur und Feuchtigkeit bestimmen, sieht er kein Berechnungsproblem. Aber hier liegt ebenfalls eine unvollständige Kenntnis verschiedener Faktoren vor, beispielsweise bezüglich der Wärmemengen, welche die Luftmassen durch solare Ein- und Ausstrahlung erhalten, aber auch durch den Austausch mit der Oberfläche der Ozeane. Generell ist Bjerknes optimistisch, dass sich sein komplexes Modell graphisch berechnen lässt. „Wenn die graphischen Methoden fertig ausgearbeitet vorliegen und die nötigen tabellari-schen Hilfsmittel zuwege gebracht sind, so werden sich wahrscheinlich auch die einzelnen Operationen leicht ausführbar zeigen“ (Bjerknes 1904: 6). Die einzige Frage, die es dann noch zu klären gilt, ist die zeitliche und räumliche Auflösung der Berechnungen. Je höher die Auflösung ist, desto mehr Berechnungen müssen ausgeführt werden. Ist die Auflösung zu gering, sind die Resultate wenig aussagekräftig. Bjerknes geht von einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumli-

14 „Die Reibung hängt von den Geschwindigkeitsdifferenzen im unendlich Kleinen ab, während die Meteorologen gezwungen sind, mit den Durchschnittsbewegungen ausgedehnter Luftmassen zu rechnen. Man kann deshalb nicht die Reibungsglieder der hydrodynamischen Gleichungen unter Anwendung der in den Laboratorien gefundenen Reibungskoeffizienten benutzen, sondern man muß empirische Resultate über den effektiven Widerstand gegen die Bewegung der großen Luftmassen hinzuziehen. Hinlängliche Daten dieser Art besitzt man aber schon, um die ersten Versuche mit der Vorausberechnung von Luftbewegungen anzustellen“ (Bjerknes 1904: 5, 6).

chen Auflösung von einem Meridiangrad aus, denn schneller, so Bjerknes, würden sich die Luftmassen selten bewegen.¹⁵

Bjerknes Optimismus hinsichtlich der praktischen Berechenbarkeit seines mechanisch-physikalischen Modells der Atmosphäre bestätigte sich in den darauf folgenden Jahren nicht. Zum einen mangelte es an Messdaten, zum anderen wurde die graphische Berechnungsmethode des Wetters, wie 1904 vorgeschlagen, von Bjerknes nie voll entwickelt. Noch 1913, als er seine Professur für Geophysik in Leipzig antrat, war es sein Ziel, „alle mathematischen Rechenoperationen zu graphischen Operationen mit den Karten um[zu]formen. Wir haben uns in dieser Weise die Anfangsgründe einer graphischen Mathematik entwickelt, durch die wir die eine Karte aus der anderen ableiten, genau wie man sonst durch Rechnung die eine Gleichung aus der anderen ableitet“ (Bjerknes 1913: 16).¹⁶ Doch 1938 musste Bjerknes eingestehen, dass „die Ortsveränderungen der bewegten Luftmassen zu bestimmen, und die Zustände in denen sie angelangt [in der Praxis der Wettervorhersage] nach schnellen Schätzungen, nicht durch jahrelange Berechnungen, die ich bei meiner Antrittsrede in Leipzig in Aussicht gestellt hatte“ erfolgte (Bjerknes 1938: 59). Das „Bild der zukünftigen [atmosphärischen] Zustände zu konstruieren“ (Bjerknes 1904: 7), auf Basis des aktuellen physikalischen Zustandsbildes, wurde zuerst durch die Synopsis gepaart mit Beobachtungen möglich und erst wesentlich später mit dem Aufkommen leistungsfähiger Computer durch berechenbare Modelle.

15 Die Frage nach der Auflösung wird zu einer entscheidenden Frage der numerischen Simulation werden. Doch zu Beginn gibt es kaum Erfahrungswerte über eine adäquate zeitliche und räumliche Auflösung, geschweige denn stündlich erhobene Messwerte. In einem Artikel vom August 1904 geht Nils Ekholm für die zeitliche Diskretisierung von Luftdruckprognosen auf Basis synoptischer Karten von einem zwölf Stunden Intervall aus (vgl. Ekholm 1904). Und in einem Artikel vom September desselben Jahres weist R. Nimführ auf die Notwendigkeit hin, „auch die Wetterfaktoren aller umliegenden Wetterräume bis zur Grenze der in Betracht kommenden Wetterzone“ bei einer quantitativen Wetterprognose zu berücksichtigen (Nimführ 1904: 408).

16 „Ich würde aber mehr als froh sein, wenn ich die Arbeit soweit führen könnte, daß ich durch jahrelange Rechnungen das Wetter von nur einem Tage auf den anderen ausrechnen könnte. Wenn nur die Rechnung stimmte, so wäre der wissenschaftliche Sieg errungen. Die Meteorologie wäre dann eine exakte Wissenschaft, eine wirkliche Physik der Atmosphäre geworden“ (Bjerknes 1913: 13, 14).

Dennoch versuchte Lewis Fry Richardson in den 1910er Jahren ein numerisches Wettermodell per Hand zu berechnen.¹⁷ „The fundamental idea is that atmospheric pressures, velocities, etc. should be expressed as numbers, and should be tabulated at certain latitudes, longitudes and heights, so as to give a general account of the state of the atmosphere at any instance, over an extended region, up to the height of say 20 kilometers. [...] It is shown that there is an arithmetical method of operating upon these tabulated numbers, so as to obtain a new table representing approximately the subsequent state of the atmosphere after a brief interval of time, dt say. The process can be repeated so as to yield the state of the atmosphere after $2dt$, $3dt$ and so on“ (Richardson 1922: 1). 1922 beschreibt Richardson auf über zweihundert Seiten in seinem Buch *Numerical Weather Prediction*, wie die schrittweisen Berechnungen auszuführen sind: „But whereas Prof. Bjerknes mostly employs graphs, I have thought it better to proceed by way of numerical tables. The reason for this is that a previous comparison of the two methods, in dealing with differential equations, had convinced me that the arithmetical procedure is the more exact and more powerful in coping with otherwise awkward equations“ (Richardson 1922: VIII). Um sein Modell zu berechnen, wählte Richardson ein Berechnungsgitter, dessen Abstand der Berechnungspunkte voneinander dem realen Abstand von 130 Kilometern nahe kam. Dies entsprach der damaligen Verteilung der zweiunddreißig Messstationen in Großbritannien, würde man sie jeweils ins Zentrum eines Polygons des Berechnungsgitters setzen. Tatsächlich waren die Stationen jedoch unregelmäßig verteilt. Für die vertikale Verteilung wählte er sieben Schichten. Damit erhielt er ein dreidimensionales Berechnungsmodell, welches den Zustand der Luftmassen in deren horizontalen wie auch vertikalen Veränderungen darstellte. Für die zeitliche Diskretisierung richtete sich Richardson ebenfalls nach dem damals aktuellen Standard von 12-stündlichen Messungen. Trotz der detaillierten Überlegungen bezüglich des mathematischen Modells, der vertretbaren Vereinfachungen sowie möglicher Fehlerquellen gelang es Richardson nicht, eine akkurate Vorhersage für ein einfaches Beispiel wie die Veränderung des Luftdrucks innerhalb von sechs Stunden zu berechnen. Obwohl er mehr als sechs Wochen damit zubachte, die Berechnungs-

17 Richardson arbeitete die Berechnungen während seiner Dienstzeit als Sanitäter im ersten Weltkrieg aus. „In his spare time in France he set up and designed various simple meteorological instruments and took readings. Also, he had brought along the first draft of his book on numerical weather prediction, and during a six-week period he worked on a specific calculation [...] to show how the numerical forecasting system might be used in practice“ (Hunt 1997: XIX).

schritte auszuarbeiten und die einzelnen Berechnungen durchzuführen, lag seine Prognose von 145 hPa Luftdruckänderung um das fünfzigfache über der tatsächlich gemessenen Luftdruckänderung. Die unzureichenden und ungenauen Messdaten zur Initialisierung seiner Berechnungen waren ein Grund für sein Scheitern.¹⁸ Dennoch demonstrierte Richardson eindrucksvoll die Prinzipien der numerischen Wettervorhersage, wie sie später mit den Computermodellen zum Alltag wurde. Dabei ging seine Vorstellung so weit, dass er sich eine Wettervorhersagefabrik ausmalte, in welcher 64.000 menschliche Computer parallel das Wetter von morgen berechnen sollten. Seine Vision beschreibt dabei recht zutreffend die Arbeitsweise heutiger Parallelrechner:

„Imagine a large hall like a theatre except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a map of the globe. The ceiling represents the north polar regions, England is in the gallery, the tropics in the upper circle, Australia on the dress circle and the antarctic in the pit. A myriad computers are at work upon the weather of the part of the map where each sits, but each computer attends only to one equation or part of an equation. The work of each region is coordinated by an official of higher rank. Numerous little ‚night signs‘ display the instantaneous values so that neighboring computers can read them. Each number is thus displayed in three adjacent zones so as to maintain communication to the North and the South on the map. From the floor of the pit a tall pillar rises to half the height of the hall. It carries a large pulpit on its top. In this sits the man in charge of the whole theatre; he is surrounded by several assistants and messengers. One of his duties is to maintain a uniform speed of progress in all parts of the globe. In this respect he is like the conductor of an orchestra in which the instruments are slide-rules and calculating machines. But instead of waving a baton he turns a beam of rosy light upon any region that is running ahead of the rest, and a beam of blue light upon those who are behindhand. Four senior clerks in the central pulpit are collecting the future weather as fast as it is being computed, and dispatching it by pneumatic carrier to a quiet room. There it will be coded and telephoned to the radio transmitting station“ (Richardson 1922: 219).

18 „Richardson ascribed the unrealistic value of pressure tendency to errors in the observed winds which resulted in spuriously large values of calculated divergence. This is true as far as it goes. However, the problem is deeper [...] A subtle state of balance exists in the atmosphere between the pressure and wind fields, ensuring that the high frequency gravity waves have much smaller amplitude than the rotational part of the flow. Minor errors in observational data can result in a disruption of the balance, and cause large gravity wave oscillations in the model solution“ (Lynch 1999: 15).

Richardsons Computerschema zur Berechnung eines relativ komplexen Modells der Wetterentwicklung demonstrierte trotz Fehlprognose die Machbarkeit der numerischen Wettervorhersage. Fortschritte in der Differenzenmethode, also der diskreten Approximation von Differentialgleichungen, bilden die mathematische Grundlage hierfür. Entwickelt wurde die Differenzenmethode erstmals 1759 von Joseph Luis Lagrange.¹⁹ Gleich zu Anfang schreibt Richardson: „Finite arithmetical differences have been proved remarkably successful in dealing with differential equations“ (Richardson 1922: 1). Das ist auch der Grund, warum er sich gegen eine graphische Berechnungsmethode im Sinne Bjerknes entscheidet und für die numerische plädiert.²⁰ Doch der Mangel an Rechenkraft limitierte seine Möglichkeiten derart, dass die numerische Methode zu diesem Zeitpunkt nicht ernsthaft für die Wetterprognose in Betracht gezogen werden konnte. Erst dreißig Jahre später mit dem Aufkommen der ersten automatischen Rechenmaschinen gewinnt die numerische Prognose an Bedeutung. Bereits 1954 in Schweden und ab 1955 in den USA beginnt die Ära der numerischen, computerbasierten Wettervorhersage.

Von Wetter- zu Klimamodellen

Am Beginn der computerbasierten Modellierung atmosphärischer Phänomene stehen nicht die Klimamodelle, sondern einfache Wettermodelle. Im August 1946 traf sich auf Einladung von John von Neumann eine Gruppe US-amerikanischer und skandinavischer Meteorologen am IAS Institute for Advanced Study in Princeton.²¹ Von Neumann, der am Bau

19 Herman Goldstine schreibt in seiner historischen Analyse des Calculus: „I am not able to find in Euler any suggestion that his method for finding a root of an algebraic equation is intimately related to linear difference equations. It appears that Lagrange was the first to have made the connection. In fact, in an early paper (1759) we see him solving linear difference equations with constant coefficients with the help of the so-called characteristic equation. Moreover, it is here that he introduces his ‚method of variation of parameters for solving a nonhomogeneous equation given solutions of the homogeneous one‘“ (Goldstine 1977: 145).

20 Ab den 1920er Jahren wurden Hollorith-Maschinen für die Wetterprognose verwendet. „In the late 1930s the weather service of every major European country was analyzing data by means of punched cards. [...] Tabulating equipment thus made it possible to use many more data than was possible before. Another important result was a higher standard of weather data“ (Nebeker 1995: 93).

21 Der Einfluss der beiden Weltkriege auf die Fortschritte der Wissenschaft, auch der Meteorologie ist enorm. 1946 sieht die Situation für Meteorolo-

seines programmierbaren IAS Computers arbeitete, hatte ein meteorologisches Problem für den Test seines Computers ausgewählt. Jule Charney, der zu diesem Treffen eingeladen worden war, arbeitete zu jener Zeit an einer Theorie quasi-geostrophischer Bewegung, welche im Kontext der numerischen Anwendung genau jene Probleme vermied, die Richardson zuvor zu seiner verhängnisvollen Fehlprognose geführt hatten (vgl. Charney 1948).²² Ab 1948 übernahm er die Leitung der meteorologischen Gruppe in von Neumanns Computerprojekt und entwickelte mit Kollegen ein erstes Computermodell für die Wettervorhersage (vgl. Charney, Eliassen 1949). In seinem Artikel *On a physical bias for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere* beschreibt Charney sein Programm einer numerischen Wettervorhersage: „First justifying the geostrophic system, then beginning with simple models and finally progressing to more complicated models. [...] NWP should proceed by gradually including those factors that experienced forecasters had found useful“ (Charney zitiert nach Phillips 2000: 16; vgl. Charney 1949).

Die Grundlage dieses ersten Computermodells bildete ein barotropes Modell, in welchem der Luftdruck eine Funktion der Dichte ist und in dem die Flächen gleichen Drucks (Isobaren) parallel zu den Flächen gleicher Temperatur verlaufen. In einem solchen, stark idealisierten Modell ist die Windgeschwindigkeit konstant. Aufbauend auf dieses idealisierte Modell entwickelten Charney und seine Kollegen Randbedingungen für die vertikale und horizontale Auflösung des Modells, um es für eine 500 mb Höhe auf dem Computer berechnen zu können.²³ Von Neumann beschrieb das Modell auf einem Vortrag 1954 in Deutschland:

gen komplett anders aus als 1904. Es standen wesentlich mehr Messdaten zur Verfügung, leistungsfähigere mechanische Rechenmaschinen, ausgefilterte Methoden der Prognose auf Basis synoptischer Karten und wesentlich mehr Spezialisten.

- 22 Die geostrophische Bewegung ist ein idealisiertes Wind-Modell, bei dem sich der Wind parallel zu den Isobaren bewegt und in welchem sich Druckgradient und Corioliskraft gegenseitig aufheben. „By the end of 1947, he had found a ‚filtering‘ method which would remove ‚noise‘ – energy waves that did not contribute to the solution, but which complicated the solution. Von Neumann was pleased when he found out that Charney was interested in the Meteorological Project“ (Harper 2004: 86).
- 23 500mb entsprechen nach der barometrischen Höhenformel in etwa der Höhe von 5.000 Metern und damit der Mitte der Troposphäre, in der sich nahezu alle wetterrelevanten Phänomene abspielen und die in 10 bis 12 km Höhe reicht.

„Das vereinfachte Modell der atmosphärischen Hydrodynamik, das wir benutzten, beruhte darauf, nur die Druckverteilung in der Atmosphäre anzugeben. Das liegt daran, daß die rein hydrodynamischen Luftkräfte dominiert sind [...] nämlich in erster Linie durch die Schwerkraft und in zweiter Linie durch die von der Drehgeschwindigkeit der Erde herrührende Corioliskraft (die letztere aber nur außerhalb der Äquatorialzone!). Hieraus folgen – durch gewisse legitime Vernachlässigungen – zwei wichtige vereinfachende Prinzipien, nämlich das ‚hydrostatische Prinzip‘ (der Schwerkraft entsprechend) und das ‚geostrophische Prinzip‘ (der Corioliskraft entsprechend). Mit ihrer Hilfe bestimmt die Druckverteilung die Temperaturverteilung (hydrostatisches Prinzip) und daher auch die Entropieverteilung sowie die Horizontalkomponenten der Geschwindigkeitsverteilung (geostrophisches Prinzip) und, wenn nötig, auch deren Vertikalkomponente (Erhaltung der invarianten Kombination von Entropie und Wirbelvektor – die ‚spezifische Wirbelstärke‘ von C.A.G. Rossby). Daher lassen sich in dieser (sehr günstigen!) Situation die üblichen Differentialgleichungen der Hydrodynamik derart umformen, daß in ihnen nur die Druckverteilung vorkommt. [...] Diese Umformung der hydrodynamischen Differentialgleichung [...] ist eine der schönen Leistungen J. Charney. In dieser Form können die Differentialgleichungen dann für irgendwelche ausgedehnte, in Bezug auf meteorologische Phänomene in allen Höhenlagen und jederzeit wohlbeobachtete Teile der Erdoberfläche angesetzt werden“ (von Neumann 1954: 262, 263).

Die erste Wettersimulation wurde 1950 auf ENIAC durchgeführt, da der IAS Computer noch nicht fertig gestellt war. Eine 24-Stunden Prognose der Luftdruckänderung für eine einzige Luftschicht benötigte auf ENIAC 24 Stunden Rechenzeit, während sie später auf dem IAS Computer nur noch 6 Minuten dauerte. Denn die „1-Lagen-Rechnung erforderte etwa 200 000 Multiplikationen“ (von Neumann 1954: 266).²⁴ Insgesamt berechneten Charney et al. 1950 vier 24-Stunden und zwei 12-Stunden-Vorhersagen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden auf über hunderttausend Lochkarten gespeichert. Optimistisch verkündete von Neumann in Folge der geglückten Berechnungen: „Wir wissen, daß das 1-Lagen-Modell in der Regel ungefähr so gut ist wie ein erfahrener ‚subjektiver‘ Wettersachverständiger [...] während das 3-Lagen-Modell wesentlich besser ist“ (von Neumann 1954: 266). Dieser Optimismus war jedoch zu Beginn der numerischen Wettersvorhersage kaum gerechtfertigt. Es zeigten sich schnell die intrinsischen Probleme von Charneys barotropem Modell. Sobald man das Modell mit schnelleren Computern für eine Halbkugel berechnen konnte, traten Fehler in der Ausbreitung großräumiger Wellen auf. Die Kritik wurde laut, dass die Berechnung

24 1-Lagen-Rechnung meint die vertikale Auflösung in einer Schicht. Es handelt sich um ein einfaches, zweidimensionales Modell.

des Luftdrucks noch keine Wettervorhersage darstelle: „500 mb geopotential is not weather’. According to Charney, Norbert Wiener at MIT, who proposed to employ linear ‚black box’ prediction methods based on long time series of past data, stated: Von Neumann and Charney were misleading the public by pretending that the atmosphere was predictable as deterministic system“ (Arakawa 2000: 6). Zudem entsprachen die Vereinfachungen dieses ersten Modells weitgehend jenen Vereinfachungen, die Bjerknes in seiner Konzeption von 1904 ablehnte. Dennoch setzten sich die barotropen und baroklinen Modelle, und damit die deterministische Methode für die Wettervorhersage durch (vgl. Phillips 1951; Eliassen 1952; Charney, Phillips 1953; Bolin 1953). Die baroklinen Modelle wurden später durch so genannte primitive barokline Gleichungen abgelöst (vgl. Smagorinsky 1958; Hinkelmann 1959). „Diese frühen numerischen Vorhersagen (für eine trockene Atmosphäre in einer begrenzten Region) führten zur Entwicklung von Mehrschichtenmodellen, wie sie bis heute andauert“ (Gates 2003: 4).²⁵ Akio Arakawa bezeichnete den Zeitraum von 1950 bis 1960 als „epoch-making first phase. [...] Through this work, the relevance of such a simple dynamical model for daily change of weather was demonstrated for the first time in history, and thus dynamic meteorologists began to be directly involved in the practical problem of forecasting. In this way, dynamic meteorology and synoptic meteorology began to merge during this phase“ (Arakawa 2000: 6, 7).

Der Erfolg der baroklinen Modelle veranlasste Meteorologen wie Norman Phillips dazu, die Frage zu stellen, ob diese Modelle auch für die Prognose allgemeiner atmosphärischer Zirkulationseffekte genutzt werden konnten. Phillips, der ab 1952 mit Charney in von Neumanns meteorologischem Projekt arbeitete, programmierte ein Modell, mit dem er zeigen wollte, dass sich die grundlegenden Muster der globalen Zirkulation auf Basis mathematischer Gleichungen erzeugen lassen. Sein numerisches Experiment von 1956 gilt heute als Auftakt der Klimamodellierung, wenngleich es sich dabei um ein sehr einfaches 2-Schichten-Modell handelte. In dem Artikel *The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment* beschrieb er sein Experiment, das die konzeptuellen Modelle der Zirkulation von Halley, Hadley, Dove, Ferrel

25 In Schweden hatten die Meteorologen Zugriff auf BESK, einen Computer, der Anfang der 1950er Jahren nach dem Vorbild von John von Neumanns IAS Computer gebaut worden war. Zwischen den Gruppen in Princeton und Stockholm bestand ein reger Austausch. Bereits Mitte 1952 nutzte Ernst Hovmöller vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut barokline Modelle zur Wettervorhersage (vgl. Harper 2004).

und andere im Computer fortführte und verfeinerte (vgl. Phillips 1956). Dieses konzeptuelle Modell der drei Zirkulationsregime – Tropen (Hadley cell), gemäßigte Breiten (Ferrel cell) und polares Regime (s. Abbildung 7) – war zu Beginn des 20. Jahrhunderts zunehmend detailliert (vgl. Rossby 1927, 1938; Palmen 1949; Riehl et al. 1954) und mit den hydro- und thermodynamischen Gleichungen verknüpft worden (vgl. Bjerknes 1904). In seinem Experiment untersuchte Phillips die verschiedenen Muster der Zirkulation: „We see the appearance of a definite three-cell circulation, with an indirect cell in middle latitudes and two somewhat weaker cells to the north and south. This is a characteristic feature of the unstable baroclinic waves in the two-level model“ (Phillips 1956: 144, 145). Allerdings lösten sich die Strömungsmuster nach einem Monat aufgrund von Rundungsfehlern durch die Diskretisierung in Chaos auf.²⁶ Dennoch stellte in der anschließenden Diskussion des Experiments unter Meteorologen Eric Eady fest: „Numerical integration of the kind Dr. Phillips has carried out give us a unique opportunity to study large-scale meteorology as an experimental science. By using a simple model and initial conditions which never occur in the real atmosphere he has been able to isolate, and study separately, certain fundamental properties of atmospheric motion – the kind of procedure adopted by all good experimenters“ (Eady zitiert nach Lewis 2000: 117). Mit Phillips’ numerischem Experiment von 1956 eröffnete sich der Weg, auf Basis numerischer Computereperimente klimatische Prozesse zu studieren, und die „magnificent second phase“ (Arakawa 2000: 21) der globalen Zirkulationsmodelle begann, welche die baroklinen Modelle ablösten.²⁷ Arakawa, ein führender Klimaforscher dieser zweiten Phase, berichtete über diese Zeit: „I myself was also extremely inspired by Phillips’ work. [...] Phillips’ work highlighted the fact, which people began to recognize around that time, that the dynamics of cyclones and that of general circulation are closely related“ (Arakawa zitiert nach Lewis 2000: 119). Dieser Zusammenhang zwischen der globalen Zirku-

26 „After 26 days, the field of V became very irregular owing to large truncation errors“ (Phillips 1956: 145). Die Problematik von Rundungsfehlern, die sich im Laufe der Iterationen von Zeitschritt zu Zeitschritt aufschaukeln können, war bereits John von Neumann bekannt (vgl. von Neumann 1946). Noch während Phillips’ Experiment organisierte von Neumann 1955 die Tagung *On the Application of Numerical Integration Techniques to the Problem of the General Circulation* (vgl. Pfeffer 1960; Küppers, Lenhard 2005).

27 „Between the late 1950s and the early 1960s, four separate groups began – more or less independently – to build many-leveled, three-dimensional GCMs based on the primitive equations of Bjerknes and Richardson“ (Edwards 2000: 71).

lation und dem Entstehen von Zyklonen, welche regionale Wetterphänomene verursachen, stellt das Scharnier zwischen Klimaforschung und Wettervorhersage dar. Es zeigt sich darin, dass sowohl Klima- wie auch Wettermodelle seit den 1960er Jahren auf globalen Zirkulationsmodellen basieren.

Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit der Computer wurden auch die Modelle komplexer und die numerischen Experimente umfangreicher. Vor allem die räumliche Auflösung der Modelle nahm zu. Während Charneys Berechnungen noch auf das Gebiet der USA begrenzt waren, wurden die folgenden Modelle anfangs für eine Hemisphäre und später für den gesamten Globus berechnet. Parallel dazu verfeinerte sich die horizontale Auflösung der Modelle wie auch die vertikale Auflösung in Schichten. Mussten sich Charney und von Neumann noch mit einer beziehungsweise mit drei Schichten begnügen, so wurden die Modelle der 1960er und 1970er Jahre für bis zu neun Schichten berechnet. Die höhere räumliche Auflösung erfordert wiederum eine feinere zeitliche Auflösung. Auf diese Weise schrauben sich die Auflösung und damit der Rechenaufwand der Modelle kontinuierlich nach oben. Heutige Atmosphärenmodelle werden global für eine horizontale Auflösung von 60 bis 110 Kilometern und einer vertikalen Auflösung von mehreren Duzend Schichten im 10-Minuten-Takt berechnet.

Die Entwicklungen der zweiten Phase vom Beginn der 1960er bis zum Ende der 1980er Jahre führte zu einer Fülle unterschiedlicher Modelle und Modellierungsstrategien. Neben einfachen Energiebilanzmodellen, welche die Ein- und Ausstrahlung der solaren Energie und damit einen möglichen Treibhauseffekt simulieren, entstanden die zunehmend komplexeren, globalen Zirkulationsmodelle der Atmosphäre. Zudem wurden Ozean-, Eis- und Landmodelle entwickelt. Bereits 1969 koppelten Syukuro Manabe und Frank O. Bryan ein Atmosphären- mit einem Ozeanmodell und gaben damit die zukünftige Entwicklung gekoppelter Modelle vor (vgl. Manabe, Bryan 1969). Während sich jedoch zu Beginn der zweiten Phase der Ehrgeiz auf die zunehmend realistischere Modellierung der Zirkulationsmuster konzentrierte, wurden die Modelle nach und nach für experimentelle Fragestellungen zu Klimaprozessen genutzt. Grundlegende Voraussetzung dafür war die Überwindung zahlreicher Modellierungsprobleme sowie die Einbeziehung von Prozessen, die nicht durch die großskalige Zirkulation berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung dieser subskaligen Prozesse findet in Form von Parametrisierungen statt, beispielsweise „if the grid points in a horizontal plane are 100 km apart, then thunderstorms, which are typically several kilo-

meters across, cannot be directly represented. Their cumulative effect on, say, temperature or moisture content of the air in a region can, however, be estimated using statistical information about the likelihood, size, and intensity of thunderstorms in a larger region whose average properties are known“ (Nebeker 1995: 179).²⁸ Diese kumulativen Effekte müssen dann als global gemittelte Parametrisierungen dem Modell hinzugefügt werden. Typische Parametrisierungen umfassen die solaren und terrestrischen Strahlungsprozesse, die Phasenänderungen des Wassers in Form von Eis- und Wolkenbildung, die Konvektion sowie turbulente Austauschprozesse in der atmosphärischen Grenzschicht an der Erdoberfläche. Es sind die Parametrisierungen, welche die Modelle zunehmend in ihrem Codierungsumfang anwachsen und dadurch realitätsnaher werden lassen, welche aber erst dadurch die Experimente zum Klimawandel ermöglichen. Solche ersten Experimente zur Auswirkung der Verdoppelung der Kohlendioxidmenge in der Atmosphäre (vgl. Manabe, Wetherald 1975), zum klimatischen Einfluss der Waldrodungen in den Tropen (vgl. Charney 1975) oder zum Paläoklima (vgl. Gates 1976) gaben Einblicke in die komplexen Zusammenhänge des Klimas und Ausblicke auf mögliche Zukunftsszenarien.

Eine wichtige Entwicklung dieser zweiten Phase der computerbasierten Meteorologie war die Einführung neuer Modellierungsstrategien. Beispielsweise eliminierte Arakawa 1966 an der UCLA University of California in Los Angeles die Instabilitäten in Phillips' Experiment.²⁹ Indem er anstelle der Glättungsmethoden, mit welchen andere Modellierer die Instabilitäten auszugleichen versuchten, die Erhaltung der kinetischen Energie in sein Modell einführte, gelang es ihm, die Simulationsresultate zu stabilisieren.³⁰ In der General Circulation Research Section, welche

28 „With the introduction of the computer into meteorology came a new style of research in which numerical modeling was the dominant methodology. [...] A conspicuous effect of numerical modeling on research style was that parameterization became an important activity“ (Nebeker 1995: 177, 178).

29 Akio Arakawa, der 1961 von Yale Mintz an das Department of Meteorology der UCLA University of California in Los Angeles geholt wurde, gehörte zu den einflussreichsten Innovatoren der Klimamodellierung in den 1960er und 1970er Jahren.

30 „So ging er von der Erhaltung der kinetischen Energie in der Atmosphäre aus, obwohl klar war, dass diese Energie durch Reibung in Wärme umgesetzt wird, also definitiv nicht erhalten wird. [...] Physikalisch argumentiert kann man sagen, dass Arakawa mit der Erhaltung der kinetischen Energie künstlich das Anwachsen der Instabilitäten begrenzt hat. In der wirklichen Atmosphäre besorgt dies die Reibung“ (Küppers, Lenhard 2005: 322).

später als GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory an die Universität Princeton umsiedelte, entwickelten Syukuro Manabe und Joseph Smagorinsky ein Modell, das erstmals die konvektiven Prozesse berücksichtigte (vgl. Manabe et al. 1965). Konvektive Prozesse sorgen für die Erwärmung der Atmosphäre sowie deren Stabilisierung. Da diese Prozesse auf Skalen von Mikrometern bis Kilometern stattfinden, werden sie nicht durch die Modelldynamik aufgelöst und müssen parametrisiert werden. Da es jedoch kein empirisches Referenzmodell als Orientierungshilfe für eine adäquate Parametrisierung gibt, behilft man sich mit einer Anpassung der vertikalen Temperaturprofile während des Simulationslaufs. Dabei werden die Temperaturprofile für jeden Zeitschritt geprüft und gegebenenfalls durch Umverteilung stabilisiert. „Tritt in irgendeiner Modellschicht Übersättigung auf, so wird der überschüssige Wasserdampf als Niederschlag ausgeschieden. Das convective adjustment sorgt damit für einen Wärmeübergang von der Erdoberfläche in die Atmosphäre (wenn die unterste Modellschicht instabil wird), erwärmt die Atmosphäre durch Freisetzung latenter Wärme bei der Kondensation und stabilisiert die Atmosphäre durch vertikale Umverteilung der Energie“ (Roekner 2003: 9). Dieser Ansatz ist bis heute in Zirkulationsmodellen weit verbreitet. Eine Fülle weiterer Modellierungsstrategien von Prozessen folgte. In einem Vergleich der ersten drei Zirkulationsmodelle durch Charney 1978 bestach Arakawas Modell aufgrund seiner realistischen Ergebnisse. „Three general circulation models [Cecil E. Leiths Modell (LLNL Lawrence Livermore National Laboratories), Joseph Smagorinskys Modell (GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton) und Aiko Arakawas Modell (UCLA University of California, Los Angeles)] were used for parallel integrations of several weeks to determine the growth of small initial errors. Only Arakawa's model had the aperiodic behavior typical of the real atmosphere in extratropical latitudes, and his results were therefore used as a guide to predictability of the real atmosphere“ (Phillips 2000a: XXIX).

In dieser zweiten Phase formierten sich verschiedene Gruppen von Modellieren an unterschiedlichen Institutionen, welche einflussreiche Modellgenerationen entwickelten. Zwischen 1961 und 1963 hatten Yale Mintz und Akido Arakawa das erste UCLA Modell entwickelt, ein 2-Schichten Zirkulationsmodell, das eine realistische Land- und See-Eis-Verteilung berücksichtigte. Diesem Prototyp folgten vier Generationen von Zirkulationsmodellen, die unter anderem vom GISS Goddard Institute for Space Studies der NASA, der US Navy und anderen Institutionen verwendet wurden (vgl. Edwards 2000). Am GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory an der Universität Princeton entwickelten Joseph Smagorinsky, Gründer der General Circulation Research Sec-

tion/Laboratory des U.S. Weather Bureau, der die Arbeit von Charney und von Neumann fortführte, und Syukuro Manabe verschiedene und sehr einflussreiche Modellgenerationen.³¹ Der MARKFORT-Serie der 9-Schichten Zirkulationsmodells mit ‚convective adjustment‘ folgte die Zodiac-Serie, deren Modelle bis in die 1970er Jahre genutzt wurden. Die anschließenden Sector Modelle berücksichtigten bereits eine idealisierte Land-Ozean Verteilung, während die Skyhigh-Modelle eine hohe vertikale Auflösung aufwiesen. „In the mid-1970s, GFDL imported a copy of the spectral GCM code developed by W. Bourke at the Australian Numerical Meteorological Research Centre (Bourke, 1974; Gordon, 1976; Gordon and Stern, 1974). Interestingly, Bourke and Barrie Hunt had originally worked out the spectral modeling techniques while visiting GFDL in the early 1970s“ (Edwards 2000: 73).³² Weitere wichtige Orte der Modellentwicklung in den USA waren die LLNL Lawrence Livermore National Laboratories mit Cecil E. Leiths LAM Modell, das 1960 gegründete NCAR National Centre for Atmospheric Research mit den NCAR 1-3 Modellen von Akira Kasahara und Warren Washington sowie ab den späten 1970er Jahren den CCM 0-1 Community Climate Models.

Außerhalb der USA begann die Entwicklung globaler Zirkulationsmodelle in den 1960er Jahren am Australian Numerical Meteorological Research Centre, in den 1970er Jahren am britischen Meteorological Office, gefolgt von Modellentwicklungen am ECMWF European Centre for Medium Range Weather Forecast in Großbritannien, dem Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg und an anderen Orten.

-
- 31 Die 1955 gegründete General Circulation Research Section des U.S. Weather Bureau war in Suitland, Maryland ansässig, unweit der JNWP Joint Numerical Weather Prediction Unit. 1959 wurde die Sektion in General Circulation Research Laboratory umbenannt und nach Washington, D.C. umgesiedelt. 1963 erfolgte eine weitere Umbenennung in GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory und 1968 zog das GFDL an die Universität Princeton, wo es zu einem der einflussreichsten Departments der Klimamodellierung bis heute wurde.
 - 32 Die Diskretisierung der Modelle durch die Differenzenmethode erfolgte in einem rechtwinkligen Koordinatensystem (Berechnungsgitter). Dies führte zu numerischen Instabilitäten. Die Nutzung von Spektralfunktionen zur Berechnung der globalen Zirkulationsprozesse im Spektralraum vermeidet diese Instabilitäten (vgl. Bourke 1974). „Ungefähr die Hälfte der modernen GCMs haben eine spektrale Formulierung, jedoch werden die physikalischen Parametrisierungen in jedem Fall auf Gittern mit finiten Differenzen berechnet“ (Gates 2003: 4). Dabei entspricht beispielsweise einer Auflösung von 110 Kilometern im rechtwinkligen Berechnungsgitter, wie sie im vierten Assessment Report des IPCC 2007 verwendet wurde, eine T106 Auflösung im Spektralraum. Die Zahl T106 gibt die Anzahl der Wellen im Spektralraum an.

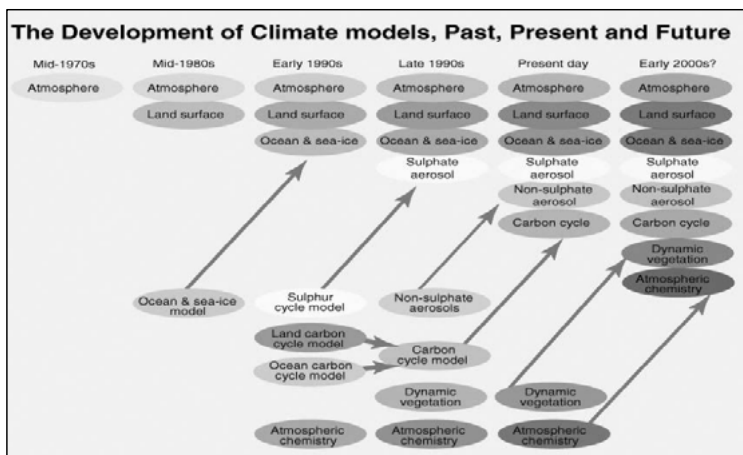
Einen aktuellen Überblick führender Klimamodelle bietet die Liste der am IPCC Assessment Report 2007 beteiligten Institutionen, wie in Abbildung 9 dargestellt.

Modelle	Institute
1: BCC-CM1, 2005	Beijing Climate Center, China
2: BCCR-BCM2.0, 2005	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway
3: CCSM3, 2005	National Center for Atmospheric Research, USA
4: CGCM3.1(T47), 2005 5: CGCM3.1(T63), 2005	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada
6: CNRM-CM3, 2004	Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques, France
7: CSIRO-MK3.0, 2001	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia
8: ECHAM5/MPI-OM, 2005	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
9: ECHO-G, 1999	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group, Germany/Korea
10: FGOALS-g1.0, 2004	National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)/Institute of Atmospheric Physics, China
11: GFDL-CM2.0, 2005 12: GFDL-CM2.1, 2005	U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/ Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA
13: GISS-AOM, 2004 14: GISS-EH, 2004 15: GISS-ER, 2004	National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA
16: INM-CM3.0, 2004	Institute for Numerical Mathematics, Russia
17: IPSL-CM4, 2005	Institut Pierre Simon Laplace, France
18: MIROC3.2(hires), 2004 19: MIROC3.2(medres), 2004	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan
20: MRI-CGCM2.3.2, 2003	Meteorological Research Institute, Japan
21: PCM, 1998	National Center for Atmospheric Research, USA
22: UKMO-HadCM3, 1997 23: UKMO-HadGEM1, 2004	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, UK

Abbildung 9: IPCC Modelle (vgl. IPCC AR4 WG1 2007: 597 - 599)

Erdsysteme

Nach der ersten ‚epoch-making‘ (bis 1950) und der zweiten ‚magnificent‘ Phase (1950 bis 1990) befindet sich die computerbasierte Meteorologie heute in ihrer dritten Phase der gekoppelten Modelle, die Arakawa die ‚great challenge phase‘ nannte (vgl. Arakawa 2000: 723ff). Dabei basiert der aktuelle Standard der Klimamodelle auf gekoppelten Atmosphären-Ozeanmodellen, welche durch Land-, Eis-, Vegetations- und verschiedene chemische Modelle ergänzt werden. Das Ziel ist es, ganze Erdsysteme zu modellieren und mit ihnen zu experimentieren. Dabei wird deutlich, dass sich das Klimasystem nicht nur auf die atmosphärischen Prozesse beschränken lässt, sondern dass die Atmosphäre eines von mehreren Subsystemen ist. Erdsysteme beschreiben die Wechselwirkungen dieser verschiedenen Subsysteme des Klimas wie der Atmosphäre, der Hydrosphäre (Ozeane, Seen, Flüsse), der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Lithosphäre (Boden und Gesteinsschichten) und der Biosphäre (Pflanzen und Tiere) auf Zeitskalen von zehn bis Hunderten von Jahren. Die Frage nach dem vom Menschen verursachten Klimawandel bringt seit neuestem die Anthroposphäre (sozio-ökonomische Entwicklungen) als ein weiteres Subsystem des Klimas ins Spiel. Die Modellierung solcher umfangreichen Modelle stellt eine große Herausforderung für die Wissenschaft dar. Zum einen müssen verschiedene Wissenschaftsbereiche mit unterschiedlichen Wissensbeständen in ein Erdsystem integriert werden. Dabei können nicht alle Bereiche auf eine so lange Modellierungserfahrung verweisen wie die Meteorologie. Zum anderen sind Erdsysteme gigantische Modelle, an welchen Duzende von Wissenschaftlern gleichzeitig arbeiten. Den Überblick zu behalten, ist dabei nicht leicht. Ein einzelner Forscher kann allenfalls seinen Modellierungsbereich überblicken und muss sich ansonsten auf die Expertise seiner Kollegen verlassen. Darüber hinaus lassen sich die verschiedenen Subsysteme nicht so einfach koppeln. Was für die Kopplung von Atmosphären- und Ozeanmodellen noch zu bewerkstelligen war, da beide Modelle auf denselben strömungsdynamischen Gleichungen basieren, gestaltet sich für die Biosphäre oder die Anthroposphäre weitaus schwieriger. Hier lassen sich keine physikalischen Grundgleichungen angeben, da die Entwicklung dieser Sphären nicht auf mechanischen Prozessen basiert.



*Abbildung 10: Entwicklung der Klimamodelle
(IPCC TAR WG1 2001: 48)*

Die aktuellen Subsystem-Modelle des Erdsystems unterscheiden sich dabei stark von den ersten Modellen, wie in Abbildung 10 dargestellt. Auch wenn für die Atmosphärenmodelle immer noch dieselbe Dynamik, basierend auf Bjerknes konzeptuellem Modell der sieben meteorologischen Variablen von 1904, verwendet wird, haben heutige Zirkulationsmodelle mit Phillips numerischem Experiment von 1956 oder dem ersten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell von Bryan und Manabe von 1967 kaum noch etwas gemeinsam. Der Fortschritt besteht in neuen Modellierungsstrategien, neuen Parametrisierungen und in verbesserten Auflösungen. Ähnliches gilt für Ozean-, Land-, Eis- und Vegetationsmodelle sowie die weiteren Modelle eines Erdsystems. Im aktuellen IPCC Bericht heißt es dazu:

„Replacing ‚slab‘ ocean models by fully coupled ocean-atmosphere models may arguably have constituted one of the most significant leaps forward in climate modelling during the last 20 years, although both the atmospheric and oceanic components themselves have undergone highly significant improvements. This advance has led to significant modifications in the patterns of simulated climate change, particularly in oceanic regions. It has also opened up the possibility of exploring transient climate scenarios, and it constitutes a step toward the development of comprehensive ‚Earth-system models‘ that include explicit representations of chemical and biogeochemical cycles“ (IPCC AR4 WG1 2007: 117).

Ein weiterer Unterschied der heutigen Forschung mit Erdsystemen zu bisherigen Atmosphärenmodellen besteht in ihrem sozio-politischen Anspruch. Je komplexer und umfangreicher das Modellsystem ist, desto mehr Antworten erhofft man sich auf die drängenden Fragen nach den Folgen des Klimawandels. Dabei verlässt die Wissenschaft ihren neutralen Platz und versucht, Aussagen über gesellschaftliche Entwicklungen zu geben. Dies hat Folgen, denn wissenschaftliche Forschung wird dabei zunehmend in problemorientierte Forschung transformiert. Diese Entwicklung lässt sich in der Klimaforschung seit den 1970er Jahren beobachten, aber die Entwicklung hin zur Forschung mit Erdsystemen dokumentiert dies besonders deutlich (vgl. Beckmann et al. 1995). Vor allem deshalb, weil „Earth scientists are unable to perform controlled experiments on the planet as a whole and then observe the results. In this sense, Earth science is similar to the disciplines of astronomy and cosmology that cannot conduct experiments on galaxies or the cosmos. This is an important consideration, because it is precisely such whole-Earth, system-scale experiments, incorporating the full complexity of interacting processes and feedbacks, that might ideally be required to fully verify or falsify climate change hypotheses“ (IPCC AR4 WG1 2007: 98). Erdsysteme nun stellen eine vielversprechende Alternative dar, um klimatische Interaktionen und Prozesse zu verstehen, aber auch um Antworten und Prognosen zu liefern. Dabei vereinigen sie immer mehr Wissenschaftsbereiche in sich. In diesem Sinne sind Erdsysteme im Begriff, sich zu den elaboriertesten Experimentalsystemen der Computational Sciences zu entwickeln.

2 FORSCHEN MIT ALGORITHMEN

Erdsysteme als komplexe, computerrealisierte Experimentalsysteme sind Instrumente einer Wissenschaft, die sich im Bereich der Algorithmen verortet. Dies aber bedeutet, dass nur das, was sich mit Algorithmen und quantitativen Datenstrukturen fassen lässt, der Forschung zugänglich ist. In der Meteorologie gewinnt dieser neue Forschungsstil mit den ersten Computereperimenten an Bedeutung. Frederik Nebeker bezeichnet in seiner Studie *Calculating the Weather* die 1950er Jahre als paradigmatische Umbruchphase:

„A new style of meteorology evolved in the 1950s. It was much the style practised by Richardson some 35 years earlier, a style that results from making a forecasting algorithm one's ultimate objective. This style is characterized by interest in only certain types of data (quantitative, and with accuracy and geographic distribution determined by needs of the algorithms), interest in only certain types of theories (quantitative, and ‚meshing‘ with other quantitative theories, and dealing with only those phenomena the algorithm indicates are important), and interest in numerical analysis and computing aids. In the 1950s it was the availability of electronic computers that turned many meteorologists in the direction taken by Richardson much earlier“ (Nebeker 1995: 152).

Wissenschaftliche Programmierung

1956 begann mit der Einführung der mathematiknahen Programmiersprache FORTRAN Formula Translator die Epoche des wissenschaftlichen Programmierens. Der Grund, warum FORTRAN schnell zur Universalsprache der wissenschaftlichen Programmierung avancierte, lag in

deren Philosophie, „a concise, fairly natural mathematical language“ (Herrick, Backus 1954: 112) für die Programmierung zu verwenden. 1954 wurden die meisten Programme noch direkt als kryptische Maschinenanweisungen an die Computer delegiert. Mathematik als natürliche Sprache der Programmierung zu verwenden, basiert dabei zum einen auf der Logik der Computer als Rechenmaschinen, zum anderen auf der zunehmenden Mathematisierung der Natur- und Ingenieurwissenschaften.¹ Beides erklärt den Erfolg dieser ersten Programmiersprache. „Fortran spread rapidly as it fulfilled a real need“ (Metcalf, Reid, Cohen 2004: 2).² Bruce Rosenblatt, einer der ersten Anwender, bestätigte, dass es einfach und naheliegend war, FORTRAN zu lernen, dass es schnell an Studenten weitergegeben wurde und, vor allem, dass die Programmiersprache verfügbar war (vgl. Rosenblatt 1984).

„The general availability of FORTRAN was probably one of the most important aspects of its perpetuation. There has been a synergistic effect in the case of the technical and scientific users. They built up great libraries of programs and subroutines that could be quickly put on new machines as they were introduced, providing they had a FORTRAN compiler. So it was fairly natural to build FORTRAN compilers for all of the new machines as they were introduced to the scientific and technical industry. [...] Probably the most important thing about FORTRAN has been its adaptability. Subroutines, on-line computer programming, operating systems, and structured programming have all been added to FORTRAN systems naturally and easily. FORTRAN has been able to keep up with the latest ideas in programming art. Several languages have been built on FORTRAN base: FORMAC, PROSPRO, in the process-control business, PLAGO in the construction business, SIMSCRIPT, and Vector FORTRAN, just to name a few. All this has helped FORTRAN and its work in the scientific community. [...] In many scientific organizations, the whole problem can be readily expressed in FORTRAN; therefore, there has been no incentive to switch“ (Rosenblatt 1984: 39, 40).

-
- 1 „Fortran’s superiority had always been in the area of numerical, scientific, engineering, and technical applications“ (Metcalf, Reid, Cohen 2004: 3). Interessanter Weise lässt sich die Verbesserung von FORTRAN mit Einschränkung als ein frühes ‚open source‘ Projekt verstehen. Der Austausch zwischen den Programmiersprachenentwicklern und Anwendern erfolgte über Treffen mit den Benutzergruppen. „Soon there were hundreds of customers making hundreds of suggestions for improvements. [...] The suggestions just poured in, and we put them in as fast as we could“ (Heising 1984: 32).
 - 2 „Inevitably dialects of the language developed, which led to problems in exchanging programs between computers, and so in 1966 the then American Standards Association (later the American National Standards Institute, ANSI) brought out the first ever standard of a programming language, now known as Fortran 66“ (Metcalf, Reid, Cohen 2004: 2).

Die Akzeptanz von FORTRAN als Programmiersprache für wissenschaftliche Modelle, die Adaption neuer Programmieranforderungen – nach FORTRAN O bis IV folgten FORTRAN f66, f77, f90, f95, 2003 und 2008 – sowie der permanente Zuwachs an programmierten Funktionen und Subroutinen der FORTRAN Libraries machen FORTRAN neben C, respektive C++, zur wichtigsten Programmiersprache der Wissenschaft. Bis heute sind die meisten Wetter- und Klimamodelle in FORTRAN geschrieben.



Abbildung 11: Klimamodellierer, der an der Parallelisierung des Modells arbeitet (Gramelsberger 2006)

Die Folge der wissenschaftlichen Programmierung ist, dass seit den 1950er Jahren große Wissensbestände auf Basis codierter Theoriemodelle in den Computer transferiert werden. Dies hat sowohl epistemische wie praktische Folgen für die Forschung. Die Praxis des wissenschaftlichen Programmierens verändert die alltägliche Arbeitsweise der Forscher, denn die vorrangigen Arbeitsinstrumente sind nicht mehr die Mess- oder Experimentierapparate, sondern die Algorithmen und Daten. Konnte man vor der Einführung der Computer an den Tätigkeiten der Forscher meist ablesen, welcher Disziplin sie angehörten – wie dies beispielsweise Bruno Latour in seiner Studie über Bodenforscher mit Fotografien eindrucksvoll belegte (vgl. Latour 2000) – so lässt sich dies für die Computational Sciences nicht mehr erkennen. Ob ein Biologe, ein Klimaforscher oder ein Physiker vor dem Computer sitzen und ihrer Arbeit nachgeht, lässt sich von außen betrachtet nicht entscheiden. Alle tun dasselbe, sie schreiben Codes. Dies zeigt, dass der Computer eine enorme Vereinheitlichung der Forschungspraxis mit sich gebracht hat und dass sich diese Vereinheitlichung auch epistemisch, in die Computer

und Modelle hinein, fortsetzt. Deutlich wird dies daran, dass codierte Modelle Schnittstellen bieten, um algorithmierte Wissensbestände anderer Disziplinen einzubinden. Erdsysteme sind hierfür gute Beispiele. Sie fungieren dabei als Attraktoren für Interdisziplinarität. Ein Klimaforscher formulierte es in einem Interview wie folgt:

„Wir haben jetzt die Klimamodelle um Vegetationsmodelle erweitert, wir interessieren uns für Mikrobiologie in den Böden, weil da Spurenstoffe aufgenommen und abgegeben werden. Wir interessieren uns für marine Biosphäre, d.h. wir arbeiten mit Zoologen zusammen. Wir arbeiten teilweise mit Wirtschaftswissenschaftlern zusammen, weil es auch um Emissionsszenarien, Energieszenarien usw. geht. [...] Meistens beginnt die Modellentwicklung erst als Folge der Zusammenarbeit. Einfach weil ein Mikrobiologe vielleicht Modellvorstellungen entwickeln wird, um seine eigenen Messungen zu interpretieren. Aber das sind so klein-skalige Modelle, die können wir für Klimamodellierung überhaupt nicht verwenden. Wir arbeiten auf Skalen von Hunderten von Kilometern. Da versuchen wir Prozesse zu beschreiben, die vielleicht teilweise im Nanobereich liegen, wenn ich an Aerosolpartikel denke. Es ist ein neues Denken für viele Leute, dass solche Modelle in Zusammenarbeit gemacht werden“ (Interview 1, 2003).

Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit setzt voraus, dass mathematische Modellierung und Programmierung, ob in FORTRAN oder C++, zum Handwerkszeug einer Disziplin und ihrer Forscher gehören. Ohne diese gemeinsame Lingua franca der Modellierung und Programmierung wären die Fortschritte in den Computational Sciences nicht denkbar. Daher verwundert es nicht, dass dieselben mathematischen Gleichungen, Modelle und gegebenenfalls Programmteile sich in unterschiedlichen Disziplinen finden lassen. So werden beispielsweise die Navier-Stokes-Gleichungen der Strömungsdynamik sowohl in Atmosphären- wie Ozeanmodellen, als auch in medizinischen wie technischen Strömungssimulationen verwendet. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass die wissenschaftliche Programmierung mit Theorie in modulare Art und Weise verfährt, insofern „sich Stücke aus [mathematisierten] Theorien verschiedener Disziplinen herauslösen lassen, um sie als Bausteine einer neuen Theorie zu verwenden, wobei sich in den neuen Kombinationen deren Bedeutungen wandeln“ können (Lüdtke 1993: 112). Doch Wissenschaft macht dies seit jeher, wenn es dem Forschungszweck dienlich ist, beispielsweise um komplexe Theorien oder Experimentalsysteme zu realisieren. Das Neue daran ist, dass nun mit Theorie ganz konkret in Form eines Baukastens – zusammengesetzt aus codierten Theoriebausteinen wie in Erdsystemen – experimentiert werden kann.

In-silico Experimentalsysteme

Solche Theoriebaukästen lassen sich auch als in-silico Experimentalsysteme beschreiben. Das Adjektiv in-silico bezieht sich auf die siliziumbasierten CPU Central Processing Units der Computerchips, also auf eine rein computerbasierte Realisation, während sich der Begriff des Experimentalsystems auf die Nutzung des Computers als Experimentierapparatur bezieht.³ Dabei handelt es sich um eine sehr spezielle Experimentierapparatur, die rein im semiotischen Medium der Zahlen operiert. Hans-Jörg Rheinberger entwickelte in seiner Studie *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Die Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas* den Begriff des Experimentalsystems am Beispiel biologischer Laborforschung (vgl. Rheinberger 2002).

„Der Begriff Experimentalsystem wird jedenfalls von Wissenschaftlern in der Biomedizin, Biochemie, Biologie und Molekularbiologie häufig benutzt, um die Rahmenbedingungen der eigenen Forschungsarbeit zu charakterisieren. Fragt man heute einen Biowissenschaftler, der im Labor tätig ist, nach seiner Arbeit, so wird er von seinem ‚System‘ erzählen und dem, was alles in diesem System passiert. Es ist also in erster Linie ein Begriff der Praktiker. [...] Betrachtet man Experimentalsysteme etwas näher, so wird man feststellen, daß in ihnen zwei verschiedene, jedoch voneinander nicht trennbare Strukturen ineinandergreifen. Die erstere kann man als Gegenstand der Forschung im engeren Sinne, Wissensobjekte oder auch epistemische Dinge bezeichnen. Als epistemische präsentieren sich diese Dinge in einer für sie charakteristischen, irreduziblen Verschwommenheit und Vagheit“ (Rheinberger 2002: 23, 24). Um diese epistemischen Dinge zu erforschen, benötigen Forscher „stabile Umgebungen, die man als Experimentalbedingungen oder als technische Dinge bezeichnen kann; die epistemischen Dinge werden von ihnen eingefasst und dadurch in übergreifende Felder von epistemischen Praktiken und materiellen Wissenskulturen eingefügt. Zu den technischen Dingen gehören Instrumente, Aufzeichnungsapparaturen und, in den biologischen Wissenschaften besonders wichtig, standardisierte Modellorganismen mitsamt den in ihnen sozusagen verknöcherten Wissensbeständen“ (Rheinberger 2002: 25).

Die Beobachtung vor Ort zeigt, dass epistemische Objekte zu technischen werden können und umgekehrt. Tatsächlich ist Laborforschung ein komplexes Wechselspiel zwischen beiden Komponenten, das sich oft in jahrzehntelanger Forschungsarbeit entfaltet, bis es zu einem be-

3 In-silico grenzt sich dabei von üblichen Charakterisierungen wie in-situ (Experimente vor Ort), in-vivo (Experimente an lebenden Organismen), in-vitro (Experimente an organischen Prozesse außerhalb lebender Organismen) ab.

friedigenden Ende kommt. Diese Perspektive auf die konkrete Forschung im Labor lässt den Werkstattcharakter der Experimentalsysteme sichtbar werden und widerspricht der wissenschaftstheoretischen Auffassung, dass Experimente wohldefinierte Verfahren seien, um Theorien zu prüfen. Geprüft werde, so Karl Popper 1935 in *Logik der Forschung*, „ob sich das Neue, das die Theorie behauptet, auch praktisch bewährt, etwa in den wissenschaftlichen Experimenten oder in der technisch-praktischen Anwendung. Auch hier ist das Prüfungsverfahren ein deduktives: Aus dem System werden (unter Verwendung bereits anerkannter Sätze) empirisch möglichst leicht nachprüfbare bzw. anwendbare singuläre Folgerungen („Prognosen“) deduziert [...] und in] den Experimenten usw., entschieden“ (Popper 1935/1989: 8).⁴

Solange ein eindeutiges System mathematisierter Sätze einer Theorie vorliegt, wie dies für die neuzeitliche Mechanik der Fall ist, dienen die Experimente der Überprüfung wie von Popper gefordert. Doch für die meisten Wissenschaftsbereiche ist die Situation weniger eindeutig. Das Experimentieren in der Realität der Labore folgt einer anderen Forschungslogik. Hier geht es weniger um die Überprüfung von theoriebasierten Hypothesen und Prognosen, als um die Stabilisierung wissenschaftlichen Wissens in einem unterdeterminierten Theorieraum flüchtiger Phänomene und vager Vermutungen. Insofern sich diese im Laufe der Laborforschung nicht stabilisieren lassen, sind sie wissenschaftlich uninteressant. Es bedarf der Stabilisierung und des evidenten Nachweises dieser Phänomene, um wissenschaftlich triftige Fakten zu generieren. Diese Fakten bedeuten nicht das Ende der Forschung, sondern meist deren Weiterführung unter neuen Bedingungen. Forschung in diesem Sinne verstanden ist ein rekursiver Prozess, dessen rekursive Differenzialität sich aus der Einfügung und Weiterverarbeitung der gewonnenen

4 Ein solches Wissenschaftsverständnis geht von mathematisierten Theorien aus, deren Prognosen sich im Experiment in Form von Ja-/Nein-Antworten entscheiden lassen: „Aus der vorläufigen Antizipation, dem Einfall, der Hypothese, dem theoretischen System, werden auf logisch-deduktivem Weg Folgerungen abgeleitet; [...] Dabei lassen sich insbesondere vier Richtungen unterscheiden, nach denen die Prüfung [der Folgerungen] durchgeführt wird: der logische Vergleich der Folgerungen untereinander, durch den das System auf seine innere Widerspruchslosigkeit hin zu untersuchen ist; eine Untersuchung der logischen Form der Theorie, mit dem Ziel, festzustellen, ob es den Charakter einer empirisch-wissenschaftlichen Theorie hat, also z.B. nicht tautologisch ist; der Vergleich mit anderen Theorien, um unter anderem festzustellen, ob die zu prüfende Theorie, falls sie sich in den verschiedenen Prüfungen bewähren sollte, als wissenschaftlicher Fortschritt zu bewerten wäre; schließlich die Prüfung durch ‚empirische Anwendung‘ der abgeleiteten Folgerungen“ (Popper 1935/1989: 8, 9).

Erkenntnisse generiert. Experimentalsysteme sind dabei „jene materiellen Formationen oder Dispositionen der epistemischen Praxis, innerhalb derer Wissenschaftler die epistemische Produktion erzeugen, die sie als die ‚Resultate‘ ihrer Arbeit apostrophieren. Ein - positives – Resultat ist ein Befund, der im Prinzip als Komponente wieder in das System eingebaut werden und es damit erweitern und verändern kann“ (Rheinberger 2002: 146).

Genau in dieser Weise charakterisiert sich auch die Verwendung von in-silico Experimentalsystemen in der täglichen Forschungspraktik. Ebenso wie die Experimentalsysteme der biologischen Laborforschung sind in-silico Experimentalsysteme evolvierende Systeme, die sich im Laufe der Forschung verändern, indem sie die erreichten Resultate inkorporieren und dadurch neue Forschung inspirieren. Im Falle der in-silico Experimentalsysteme lässt sich diese Evolution anhand des permanent wachsenden Umfangs des Codes und der aufeinander folgenden Modellversionen und -generationen explizit nachvollziehen. Eine Archäologie des Codes dieser Systeme würde deren Entwicklung rekonstruieren, da in-silico Experimentalsysteme keine materialen Formationen sind, sondern rein zeichenbasierte Objekte. Betrachtet man ein konkretes, computerrealisiertes Experimentalsystem – im Rahmen dieser Studie wäre dies das Atmosphärenmodell ECHAM5 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie⁵ – so wird bereits in der Modellbeschreibung, die jedem Wetter- oder Klimamodell beigelegt ist, auf den evolutionären Prozess der Generierung hingewiesen:

„The fifth-generation of atmospheric general circulation model (ECHAM5) developed at the Max Planck Institute for Meteorology (MPIM) is the most recent version in a series of ECHAM models evolving originally from the spectral weather prediction model of the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF; Simmons et al. (1989))“ (Roeckner et al. 2003: 5). „The climate model ECHAM5 has been developed from the ECMWF operational forecast model cycle 36 (1989) (therefore the first part of its name: EC) and a comprehensive parametrisation package developed at Hamburg (therefore the abbreviation HAM). The part describing the dynamics of ECHAM is based on the ECMWF documentation, which has been modified to describe the newly implemented features and the changes necessary for climate experiments. Since the release of the previous version, ECHAM4, the whole source code has been extensively redesigned in the major infrastructure and transferred to Fortran 95. ECHAM is now fully portable and runs on all

5 ECHAM5 ist, gekoppelt mit dem OM Ozeanmodell, eines der dreiundzwanzig globalen Referenzmodelle des vierten IPCC Reports (vgl. IPCC AR4 WG1 2007).

major high performance platforms. The restart mechanism is implemented on top of netCDF and because of that absolutely independent on the underlying architecture“ (Roeckner et al. 2003: 7).

Dieser evolutionäre Prozess der Generierung von Code macht deutlich, dass diese Systeme das Resultat einer kollaborativen Schreibaarbeit zahlreicher Autoren sind. Ein in-silico Experimentalsystem wie ECHAM5 ist ein Korpus aus gut zweihundert miteinander in Interaktion stehenden Dateien und hat sich über Jahre, oder gar Jahrzehnte, in Generationen von Modellversionen in einem kollektiven Schreibprozess entwickelt. Allerdings unterscheidet sich das Schreiben von Code vom herkömmlichen Produzieren und Publizieren von Theorie in Artikeln oder Fachbüchern ganz erheblich. In Forschungsberichten und Artikeln über Computermodelle finden sich Metaphern für diese neue Art des Schreibens wie ‚numerische Realisierung aktuellen Wissens‘, ‚komplexe mathematische Abbilder der Realität‘ oder ‚dynamisch-basierte Ansätze zur Systembeschreibung‘. Oft ist in Gesprächen mit Modellieren von Reparatur oder Tricks die Rede.⁶ Das Experimentalsystem wird als Experimentiermaschine objektiviert, an deren Schrauben man drehen kann, die sich notfalls mit behelfsmäßigen Tricks reparieren lässt. Schreiben in diesem Zusammenhang bedeutet, dass das was als Code notiert wird, aufgrund seiner Operativität funktionieren muss. Lässt sich Theorie durch Beobachtung, Messung oder Argumente bestätigen, so muss codierte Theorie zu aller erst funktionieren, also auf dem Computer laufen, bevor damit wissenschaftlich gearbeitet werden kann. Dazu müssen alle Fehler behoben sein, welche zu einem Computerabsturz führen können.⁷

6 Beispielsweise: „Eine einfache Reparatur [der Klimadrift], etwa durch Modifikation der Parametrisierung des Impulsflusses an der Ozeanoberfläche ist nicht möglich, so dass als einzige Möglichkeit langwieriges Ausprobieren bleibt. Diese Möglichkeit ist jedoch in der Regel einfach aus Gründen der Rechenzeit nicht gegeben. [...] Man versucht stattdessen mit Hilfe eines unphysikalischen Tricks, der Flusskorrektur (flux adjustment), diese Klimadrift zu vermeiden. [...] Der Trick besteht nun darin, dass man die zeitlich gemittelten Differenzen dieser Felder [Felder für Wärme-flüsse, die von den Teilmodellen separat auf Basis vorgegebener Meeresoberflächentemperaturen berechnet wurden] in den Flüssen zwischen Ozean und Atmosphäre im Zuge der gekoppelten Rechnung immer wieder hinzufügt“ (von Storch, Güss, Heimann 1999: 127, 128).

7 Fehler der codierten Theorie sind dabei noch nicht berücksichtigt. Anders gewendet: Auch wenn das Modell läuft und Resultate produziert, bedeutet dies nicht, dass es wissenschaftlich korrekte Resultate liefert. Da die materielle Widerständigkeit als experimentelles Korrektiv fehlt, müssen neue Evaluationsstrategien für die in-silico Forschung entwickelt werden.

Dieser Entstehungs- und Veränderungsprozess eines computerrealisierten Experimentalsystems wird nicht nur in den Modellbeschreibungen dokumentiert, sondern auch in den Kommentaren in den einzelnen Dateien. Im Unterschied zu Forschungsergebnissen, die klassisch in Form von wissenschaftlichen Artikeln und Vorträgen publiziert werden, stellen die Modellbeschreibungen und -programme selbst eine neue Textform dar, die sich eventuell mit Laborbüchern vergleichen lässt. Die Möglichkeit, Kommentare in Programmdateien zu schreiben, erlaubt es, Informationen über das Experimentalsystem in den Dateien zu speichern. Üblicherweise werden so die Autoren eines Modells oder einer Datei benannt, die verwendeten Konzepte unter Hinweis auf die Fachliteratur referenziert sowie Beschreibungen einzelner Funktionen oder Restriktionen des Modells gegeben. In Abbildung 12 ist dies anhand der Wolkendatei `cloud.f90` des Atmosphärenmodells ECHAM5 dargestellt. Unabhängig vom Code erschließt sich über die Kommentare die Geschichte des Experimentalsystems. Wie umfangreich der Kontext eines Modells rekonstruiert werden kann, hängt davon ab, wie sorgfältig der Code kommentiert wurde.

```

*Cloud* computes large-scale water phase changes, precipitation,

! Subject.
! -----
!
35: ! This routine computes the tendencies of the four prognostic
! variables (temperature t, specific humidity q, cloud liquid
! water xl, cloud ice xi) due to phase changes (condensation/
! deposition, evaporation/sublimation of rain/snow falling
! into the unsaturated part of the grid box, melting of snow,
40: ! melting/freezing of cloud ice/cloud water, sedimentation of
! cloud ice, and precipitation formation in warm, cold and
! mixed phase clouds.
! The precipitation at the surface (rain and snow) is used in
! later for computing the land surface hydrology in *surf*.
45: ! The cloud parameters (cloud cover, cloud liquid water and
! cloud ice are used for the calculation of radiation at the
! next timestep.

[...]

110: ! References.
! -----
!
! Lohmann and Roeckner, 1996: Clim. Dyn. 557-572
! Levkov et al., 1992: Beitr. Phys. Atm. 35-58.(ice phase)
115: ! Beheng, 1994: Atmos. Res. 193-206.(warm phase)
! Lenderink et al., 1998; KNMI-REPORT NO. 98-13 (condensation)
! Tompkins 2002, J. Atmos. Sci. (cloud cover)
!
! Authors.
120: ! -----
! M.Esch      MPI-Hamburg 1999
! G.Lenderink KNMI, de Bilt 1998
! U.Lohmann   MPI-Hamburg 1995
!
125: ! Modifications.
! -----
! E.Roeckner  MPI-Hamburg 2000
! A.Tompkins  MPI-Hamburg 2000
! U.Schlese   MPI-Hamburg 2003

```

*Abbildung 12: Kommentare zu Beginn der cloud.f90 Datei des
Atmosphärenmodells ECHAM 5 (MPI-Met 15. Juli 2005)*

Um den kollektiven Schreibprozess am Modell innerhalb einer Institution zu koordinieren und um jede Änderung des Codes sichtbar und nachvollziehbar zu machen, nutzen die Forscher CVS Concurrent Versioning Systeme. CVS Systeme sind gängige Instrumente der Softwareentwicklung, um Programmierern die aktuellste Version einer Datei für Überarbeitungen zur Verfügung zu stellen, um eine Historie der Änderungen anzulegen und um die Autoren der Änderungen zu registrieren und zu dokumentieren, wie in Abbildung 13 dargestellt. Dies ist für ein in-silico Experimentalsystem von entscheidender Bedeutung, denn jede Änderung des Codes verändert die codierte Theorie und damit das Experimentalsystem. Ein Klimamodellierer formulierte es folgendermaßen: „Wenn ich mit einem Kollegen bespreche, was ich an einem Modell ändern möchte, dann bespreche ich das im Detail und gehe unter Umständen in den Code. Wir schauen uns ein paar Zeilen vom Code an und sa-

gen, das und das möchten wir ändern oder das und das habe ich geändert“ (Interview 6, 2005). Welche Änderungen im Laufe der Modellverbesserung dabei durchgeführt werden, ist Teil der sozialen Forschungspraxis in Form von Entscheidungen und Aushandlungen. Da die Dynamik für alle Zirkulationsmodelle dieselbe ist, variieren die Modelle in der Ausgestaltung des Klimasystems mit klimarelevanten Prozessen und in der Art, wie diese Prozesse parametrisiert und programmiert sind. Dies macht den Unterschied der verschiedenen Klimamodelle aus.

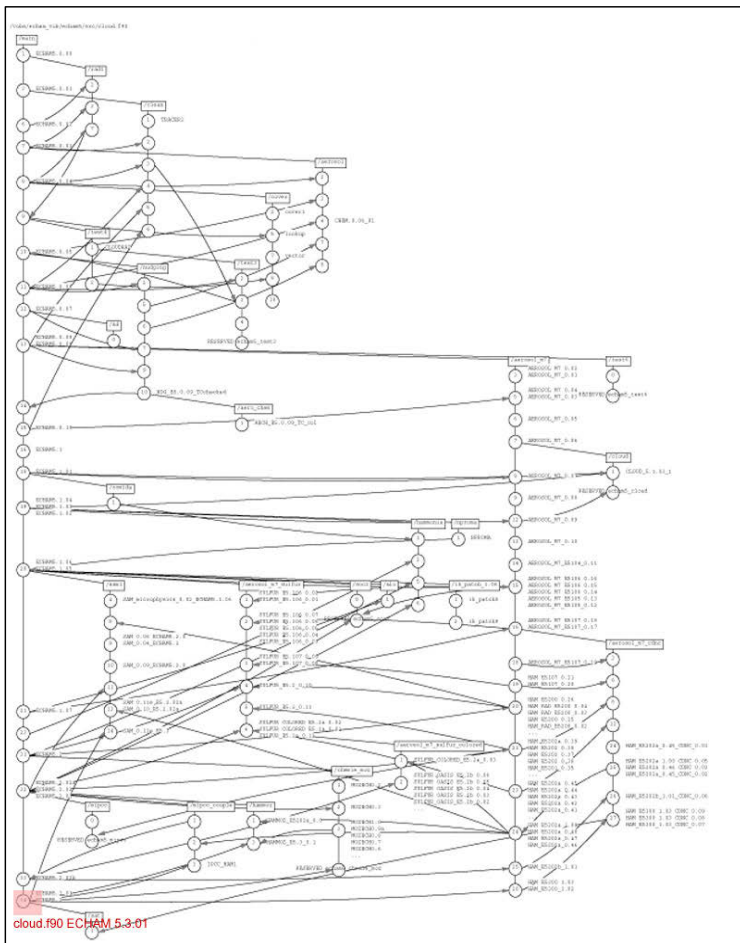


Abbildung 13: Änderungen der cloud.f90 Datei des Atmosphärenmodells ECHAM5 von Version 5.0.00 bis 5.3.01 (MPI-Met 2006)

Die permanenten Verbesserungen und Veränderungen am Code lassen aktuelle Klimamodelle zu komplexen Strukturen anwachsen, deren Einbettung in die Rechnerumgebung sich nicht einfach gestaltet. Denn auch die Rechnerumgebung ist durch Supercomputercluster, verteiltes Rechnen und Grid-Computing zunehmend komplexer und serviceintensiver geworden. Dies führt dazu, dass die Modelle durch adäquates Software-Engineering für die jeweilige Computerarchitektur optimiert werden müssen. Bei der zunehmenden Größe der Modelle erfordert dies ein neues Programmierparadigma, das die Kapselung der Programmteile vornimmt und dadurch die Komplexität eines Modells reduziert. Indem gekapselte Teile als geschlossener Baustein oder Blackbox definiert werden, lassen sich diese als Module über Schnittstellen für die Dateneingabe und -ausgabe ansteuern. „Was man dabei kapseln muss, ist nicht die Routine, die wissenschaftliche Rechnungen ausführt (z.B. Vertikaldiffusion oder allgemein Advektion),“ wie ein Klimaforscher im Interview verdeutlichte, „sondern die Verwaltung von Feldern, der Zeitsteuerung des Modells, der Parametrisierung. So entstehen Schnittstellen, an welchen man Programmteile einhängen kann, für die die benötigten Variablen geliefert und am Ende ausgeschrieben werden. Dafür gibt es Mechanismen, die einfach zu übersehen sind und die man benutzen kann. Und dann können die Wissenschaftler ihren Code einklinken“ (Interview 7, 2005). Der Code wird dadurch in Module zerlegt, die dann zu verschiedenen Experimentalsystemen kombiniert werden können. Auf diese Weise lassen sich auch ältere Modellteile einfügen, Standardisierungen einführen und Modellkomponenten ohne viel Aufwand in noch größere Systeme einbinden.

Die Software-Einbettung auf diese Weise zu verbessern, ist eine aktuelle Herausforderung vor der die Klimamodellierung steht, insbesondere wenn sie Erdsysteme realisieren will.⁸ „Das Hauptaugenmerk wird dabei darauf gelegt, möglichst allgemeine Lösungen zu entwickeln, die nicht nur in anderen Erdsystem-Modellen, sondern auch für andere Fra-

8 Dabei gilt es, die Autonomie der Forscher bei der Erstellung codierter Theorie zu erhalten. Die Delegation der Programmierung eines Modells an fachfremde Programmierer ist ein heikles Unterfangen, weil Programmierung hier wissenschaftliche Modellierung codierter Theorie bedeutet. Andererseits erfordert die zunehmende Komplexität der Rechnerarchitekturen die verstärkte Unterstützung durch Programmierer. Informatiker arbeiten jedoch meist mit anderen Programmiersprachen und wesentlich elaborierteren Softwarekomponenten als Wissenschaftler, für die die Programmierung lediglich ein Mittel zum Zweck ist. Der Einsatz professioneller Programmierer kann einerseits eine unbeabsichtigte Einflussnahme auf die Theorie bedeuten, aber andererseits auch neue Potenziale eröffnen. Da diese Entwicklungen mit Standardisierungen einhergehen, vereinfacht es beispielsweise den Modellvergleich und damit die Evaluierung der Modelle.

gestellungen und auch in Disziplinen außerhalb der Klimaforschung, wie beispielsweise der Strukturmechanik und der Strömungsmechanik, Anwendung finden können. Dies geschieht insbesondere durch modulare Kapselung von Einzelaufgaben“ (MPI Met 2008: 3). Auf diese Weise werden zunehmend komplexere und modularere Theoriebaukästen in den Computational Sciences realisiert. Die forschungspraktische Idee dabei ist, nicht nur immer umfangreichere Experimentalsysteme kollaborativ zu realisieren, sondern ein, auf die jeweilige Forschungsfrage hin zugeschnittenes Experimentalsystem nur für das jeweilige Experiment zusammenstellen zu können. Daher ist die Idee, die codierte Theorie in eine avancierte Software-Einbettung einzuklinken eine zukunftsweisende Weiterentwicklung der aktuellen Forschungspraxis mit in-silico Experimentalsystemen. Im vollen Umfange soll diese Idee im Rahmen der US-amerikanischen Initiative des ESMF Earth System Modeling Frameworks Wirklichkeit werden.

„The Earth System Modeling Framework (ESMF) collaboration is building high-performance, flexible software infrastructure to increase ease of use, performance portability, interoperability, and reuse in climate, numerical weather prediction, data assimilation, and other Earth science applications. The ESMF defines an architecture for composing complex, coupled systems and includes data structures and utilities for developing individual models. We are aiming to create a framework usable by individual researchers as well as major operational and research centers, and seek to engage the community in its development. The basic idea behind ESMF is that complicated applications should be broken up into smaller pieces, or components. A component is a unit of software composition that has a coherent function, and a standard calling interface and behavior. Components can be assembled to create multiple applications, and different implementations of a component may be available. In ESMF, a component may be a physical domain, or a function such as a coupler or I/O system. ESMF also includes toolkits for building components and applications, such as regridding software, calendar management, logging and error handling, and parallel communications“ (ESFM 2009: About ESFM)

Allerdings besteht bei diesem plug-n-play Konzept die Gefahr, die Autonomie der Forscher zu unterlaufen. Plug-n-play meint das nutzerorientierte Zusammenstecken benötigter Modellkomponenten analog einem Baukastensystem, ohne die Teile im Detail kennen und anpassen zu müssen. Das setzt eine Software-Einbettung voraus, die die Modellkomponenten als funktionale Blackboxes nicht nur kapselt, sondern abkapselt. Selbst unerfahrene Anwender können dann Experimente auf Knopfdruck ausführen. Der Modellcode wird in dieser Konzeption als abgeschlossene Funktionsmaschinerie zur Produktion von Outputdaten

definiert. Forschung und Programmierung werden dadurch strukturell wie organisationell auseinanderdividiert. Programmieren die Forscher in FORTRAN die Modelle bisher selbst, so erfordern solche großen Modellsysteme einen operationellen Betrieb.

Atmosphärenmodell

Die konkrete Ausgestaltung eines in-silico Experimentalsystems lässt sich am Beispiel des Atmosphärenmodells ECHAM5 beschreiben. Dabei repräsentiert ECHAM5 ein ‚state-of-the-art‘ Experimentalsystem der aktuellen Klimaforschung. Es ist eines von dreiundzwanzig Referenzmodellen, die für die Szenarienberechnungen des vierten IPCC Reports verwendet wurden (vgl. IPCC AR4 WG1 2007). ECHAM5 besteht aus gut zweihundert Dateien, welche in ihrer Gesamtheit die Prozesse der Atmosphäre darstellen. Dabei teilen sich die Dateien in zwei Gruppen auf: Dateien, welche die globale Dynamik beschreiben und Dateien, welche die subskalige Parametrisierungen modellieren. Die Dynamik der Atmosphäre ergibt sich, wie bereits ausführlich dargestellt, aus den Wechselwirkungen der sieben Zustandsgleichungen der meteorologisch Variablen (Temperatur, Druck, Dichte, Feuchte sowie die Windgeschwindigkeit in drei Richtungen), die im Modell in diskretisierter Form global beschrieben sind. Hinzukommen die Wirkungen der Energieflüsse – solare Einstrahlung und terrestrische Abstrahlung in Abhängigkeit von dem jeweiligen Reflexionsvermögen der Oberflächen – auf die Dynamik, die Wärme flüsse der fluiden Medien Atmosphäre und Ozeane sowie die Energietransporte der Wasserkreisläufe. Die Dynamik des Klimas ergibt sich aus den globalen Zirkulationsprozessen, die durch die Ungleichgewichte der Energiezufuhr und -abfuhr in Gang gehalten werden. Dabei spielt die Advektion, die sich aus der verstärkten Einstrahlung in den Tropen und der verstärkten Abstrahlung in den polaren Gebieten ergibt, eine wichtige Rolle: Erwärmte Luft- oder Wassermassen fließen in kältere Regionen (sensibler Wärmefluss). Aber auch die Konvektion, das Aufsteigen erwärmter Luftschichten in der Atmosphäre und die daraus entstehenden Druckunterschiede, durch das seitliche Abfließen warmer Luftmassen, ist ein maßgeblicher Faktor. Denn die räumliche Differenz von Druck und Temperatur erzeugt als eine Art Wärmekraftmaschine Bewegung in Form mechanischer Energie, also Strömung. Ein weiterer, im Modell zu beschreibender Faktor ist die Erdrotation, deren Effekt von den Tropen zu den Polen, abhängig vom relativen Abstand zur Rotationsachse der Erde, zunimmt und ein komplexes Zirkulationsmuster zur Folge hat.

Zu diesen globalen Prozessen gesellen sich lokale und regionale Effekte, die von den topographischen Gegebenheiten beeinflusst werden. Darüber hinaus unterliegt das klimatische Geschehen natürlichen Variabilitäten wie dem Jahres- und Tagesgang, Wetterereignissen und interannualen Anomalien wie den ENSO El Niño-Southern Oscillation Phänomen, der Nordatlantik Oszillation oder Sonnenflecken. All dies muss in seiner Wechselwirkung codiert und dem Modell hinzugefügt werden. Dasselbe gilt für die zahlreichen klimarelevanten Prozesse, die sich unterhalb der Auflösungsgrenze des Modells vollziehen. Sie werden als subskalige Parametrisierungen in das globale Modell integriert. Dazu gehören beispielsweise der Einfluss der Aerosole oder der Wolkenbildung. Das maßgebliche Ziel eines jeden Klimamodells ist es, die Energiebilanz des Klimasystems adäquat zu errechnen. Gleichen sich die Energieflüsse der Ein- und Ausstrahlung nicht aus, ergibt die Bilanz einen Nettofluss in Form von Erwärmung bzw. Abkühlung.⁹

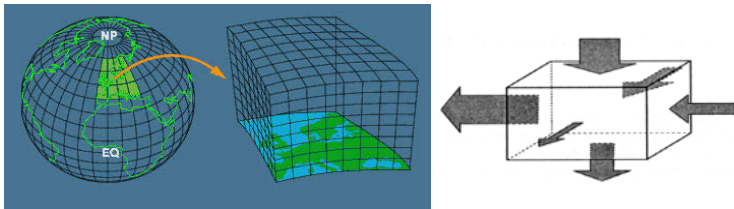


Abbildung 14: Ortsfeste Volumen (l.) sowie Zu- und Abflüsse in einem Volumen (r.) (DKRZ 2000, von Storch, Giss, Heimann 1999: 100)

- 9 Ohne Atmosphäre würde die Strahlungsbilanz der Erde eine gemittelte Temperatur von -15° ergeben, während das globale Temperaturmittel dank des Treibhauseffekts der Atmosphäre bei $+15^\circ$ liegt. Bereits 1896 stellte der Meteorologe Svante Arrhenius mit einem einfachen (nulldimensionalen) EBM Energiebilanzmodell – Einstrahlung, kurzwellige Rückstreuung und langwellige Ausstrahlung – die Theorie der Erderwärmung durch Treibhausgase auf (vgl. Arrhenius 1986, 1903). Die Temperaturänderung und damit der Nettofluss hängen dabei vom Wärmespeichervermögen der Erdoberflächen ab. Allerdings erfassen nulldimensionale EBMs nur ein global gemitteltes Gleichgewicht der Strahlungsenergien und vernachlässigen die Energietransporte von den Tropen zu den polaren Breiten. Eindimensionale EBMs modellieren diesen Energietransport als Band aus Modellvolumina vom Nord- zum Südpol. Dabei werden die an sich dreidimensionalen Energietransporte im eindimensionalen Modell als Volumenmischung vereinfacht: Ein warmes Volumenelement kühlt ab, während das benachbarte Element sich erwärmt. Zweidimensionale EBMs erlauben es, die Energieflüsse horizontal und vertikal darzustellen. Aufgrund der steigenden Rechenkapazitäten basieren heutige Klimamodelle auf dreidimensionalen, globalen Zirkulationsmodellen, so genannten GCMs Global Circulation Models.

Die beschriebenen Prozesse, die Dynamik wie die Parametrisierungen, finden Eingang in ein globales Atmosphärenmodell wie ECHAM5 und konstituieren ein komplexes in-silico Experimentalsystem. Doch um ein solches Experimentalsystem auf dem Computer zum Laufen zu bringen, bedarf es geeigneter Modellierungsstrategien, um die verschiedenen Prozesse im endlichen Berechnungsraum des Computers in effektiver Zeit zu realisieren. Das basale Konzept numerischer Klimamodellierung besteht nun darin, das Klimaverhalten als Wirkung auf Fluide in ortsfesten Volumenelementen zu betrachten, wie in Abbildung 14 dargestellt. Ein Zirkulationsmodell beschreibt also, wie sich der Zu- und Abfluss der Masselemente in einem Volumenelement verhält (Kontinuitätsgleichung), wie sich die Energieumwandlung darstellt (Energiebilanzen für Strahlung, Wärme, mechanischer Energie), welche Kräfte auf die Fluide wirken und wie sich dadurch der Betrag und die Richtung ihrer Geschwindigkeit verändern (Impulserhaltung: Bewegungsgleichungen bzw. Navier-Stokes-Gleichungen), wie die Zu- und Abnahme der Beimengungen vonstatten geht (Transportgleichungen für Salz, Wasserdampf, Spurengase, Wasser etc.) und wie sich die Dichte der Fluide in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Wassergehalt wandelt (Zustandsgleichungen). All diese Gleichungen beeinflussen sich wechselseitig. Sie sind die Grundlage der Klimasimulation, die für jedes Volumenelement den Zustand der sieben Variablen berechnet (vgl. von Storch, Giss, Heimann 1999). Hinzukommen die subskaligen Prozesse, die sich innerhalb der Volumenelemente abspielen und als Parametrisierungen in die Berechnungen einfließen.

Sobald die Programmierung einer Modellvariante, beispielsweise für ECHAM5, abgeschlossen ist, kann damit experimentiert werden, sei es zu Testzwecken, für die Forschung oder für die Erstellung von Prognosen. Doch das Experimentieren mit in-silico Experimentalsystemen unterscheidet sich in zwei Punkten grundlegend von den realweltlichen Experimenten im Labor: Zum einen gehen die Forscher nicht direkt mit Materialitäten und Objekt-Welten um, sondern lediglich mit Repräsentationen davon, in Form von Messwerten und konzeptuellen Zeichenäquivalenten. Dieser Unterschied ist entscheidend, denn während im Labor die Widerständigkeit des Materiellen über das experimentelle Gelingen oder Scheitern entscheidet, fehlt diese Widerständigkeit im rein Semiotischen der in-silico Experimentalsysteme. Daher braucht es neue Kriterien der Falsifizierung für Computerexperimente oder, positiv gewendet, neuer Evaluationsstrategien. Zum anderen bewegen sich die Experimente mit in-silico Experimentalsystemen in überdeterminierten Theorieräumen, denn diese Systeme sind als Theoriebaukästen konzipiert. Die Frage, welcher Forschungslogik sie dabei unterliegen – der Popperschen Variante der Überprüfung von theoriebasierten Hypothesen und Prognosen oder der Logik

der Laborforschung – ist einfach zu beantworten. Es handelt sich um eine neue Art des Experimentierens mit Theorien, die dem Experimentieren in den Laboren der Biologen ähnelt. Denn die Neukombination modularer Theoriebausteine erzeugt neue Bedingungen, die es anhand des simulierten Systemverhaltens zu erforschen gilt. Der Werkstattcharakter der in-silico Experimentalsysteme zeigt sich in den Tausenden von Codezeilen. Jede Änderung der Programmierung verändert gleichzeitig das Experimentalsystem und das theoriebasierte Setting wie auch das Experiment. Forschung mit Computereperimenten gleicht daher eher einem permanenten Rekonfigurieren, Differenzieren und (Re-)Arrangieren als einem exakt definierten, deduktiven Frage-und-Antwort-Vorgang.

Rechnen als Experiment

Experimentieren mit in-silico Experimentalsystemen bedeutet im Konkreten, dass Simulationsläufe durchgeführt werden. Ein Klimamodellierer beschreibt diese Art des Experimentierens wie folgt:

„Wir sprechen von Experimenten. Wir betrachten das Modellsystem als Labor. Wir machen ein Experiment, wo wir etwas ändern und sehen, was herauskommt. Das sind Computereperimente, die wir ja in der Natur nicht durchführen können oder sollten. [...] Letztendlich ist die Herangehensweise ganz ähnlich wie bei jemanden, der Messungen durchführt. Wir ändern etwas in der Modellanordnung, im System, und schauen dann, wie reagiert das System darauf und versuchen es zu verstehen. Im Idealfall läuft es so: Die Messleute finden irgendetwas, was sie sich nicht erklären können. Und dann versucht man es mit dem Modell zu erklären, versucht es zu simulieren. Das sind für uns die interessanteren Aufgaben. Man hat eine Frage, die man beantworten will. Häufig ist es umgekehrt, etwas ironisch formuliert, dass wir jede Menge Antworten produzieren und uns dann auf die Suche nach den Fragen machen“ (Interview 1, 2003).

Konkret bedeutet dies, dass die einzelnen Dateien eines Atmosphärenmodells entsprechend einem festgelegten Schema, wie in Abbildung 15 dargestellt, nacheinander ablaufen, um so – ausgehend von Anfangswerten basierend auf Messdaten für t_0 – den Zustand der meteorologischen Variablen für den Zeitpunkt t_1 zu berechnen. Indem die Resultate von t_1 als Anfangszustand für die Berechnung von t_2 verwendet werden, usw., rechnet sich das Modell Zeitschritt für Zeitschritt in die Zukunft, oder auch zurück in die Vergangenheit. In ihrer Gesamtheit bilden die Dateien das in-silico Experimentalsystem. Die spezifischen Messdaten zur Initialisierung der Simulation, die gewählte räumliche und zeitliche Auflösung sowie die spezifischen Werte für Parameter, Konstanten und Randbedin-

gungen charakterisieren als Modellkonfiguration das Experiment. Diese Informationen sind in so genannten batch files gespeichert und initialisieren das Experiment. Batch files beinhalten Anweisungen über den Start des Programms, über die Modellkonfigurationen des konkreten Experiments, über die Anzahl der benötigten Prozessoren, das Abspeichern der Zwischenschritte (Ausschreiben der berechneten Daten für einen Zeitschritt) sowie die Nachbereitung der Resultate. Für die wissenschaftliche Spezifikation des Experiments sind vor allem die Modellkonfigurationen der Anfangs- und Randbedingungen des Experiments von Bedeutung. Die in netCDF Network Common Data Form, einem der Standardformate wissenschaftlicher Datendarstellung, gespeicherten Anfangsdaten (Messwerte) werden als Anfangsbedingungen in das Programm eingelesen. Nach dieser Initialisierung erfolgt die lineare Abarbeitung der im Quellcode beschriebenen Anweisungen von Zeitschritt zu Zeitschritt. Dabei werden die Dateien in einer festgelegten Reihenfolge aufgerufen und durchlaufen, bis die Ergebnisse für den ersten Zeitschritt vorliegen und im gängigen netCDF Format in eine Datenbank ausgeschrieben werden. Diese Daten dienen dann der Initialisierung der Berechnung des nächsten Zeitschritts. Auf diese Weise arbeitet sich das Modell voran. Die Momentaufnahmen der einzelnen Zeitschritte lassen sich später als Grafiken, Bilder oder als animierter Film der Klimaentwicklung visualisieren.

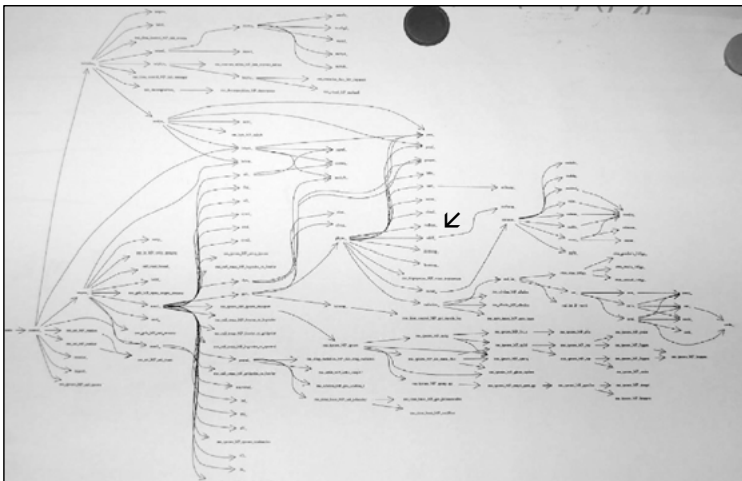


Abbildung 15: Dateidurchlauf von links nach rechts während der Berechnung des Atmosphärenmodells ECHAM5. Der Pfeil markiert die cloud.f90-Datei des Modells (Gramelsberger 2006)

Bevor Simulationsläufe jedoch zu Prognosezwecken genutzt werden können, bedarf es einer ausreichenden Testphase zur Evaluation des Modells anhand von Messdaten. Für das Atmosphärenmodell ECHAM5 dauerte diese Testphase im Zuge der Modellrechnungen für den vierten IPCC Bericht gut zwei Jahre. In dieser Zeit wurde, jeweils als Antwort auf die Testergebnisse, die Modellierung immer wieder verbessert. Aber auch während eines Experiments mit einer getesteten Modellversion werden immer wieder Testläufe in höherer Auflösung durchgeführt, um die Stabilität der Resultate während des Experiments zu kontrollieren. Ein experimentelles Setting besteht daher aus Szenarien- und Testläufen.

Ein konkretes Experiment, das 2003 der Evaluation von ECHAM5 diente, waren die Simulationsläufe zur Wetterlagenklassifikation von Jana Sillmann (vgl. Sillmann 2003). Das Experiment basierte auf der Zuordnung atmosphärischer Zirkulationsmuster zu bestimmten Wetterlagen eines konzeptuellen Wetterlagenmodells (vgl. Enke, Spekat 1997) anhand vergleichbarer Simulationsläufe mit dem gekoppelten Atmosphären-Ozeanmodell ECHAM5/MPI-OM1 und dem ungekoppelten ECHAM5 Atmosphärenmodell. Die experimentell zu bestimmenden Leitgrößen waren dabei die gemittelte Tagessumme der Niederschläge (Klassifikation von „sehr trocken“ bis „sehr starker Niederschlag“ gemäß der Niederschlagsmenge) sowie die gemittelte maximale Temperatur (Klassifikation „extrem kalt“ bis „extrem warm“ anhand jahreszeitlich bedingter Temperaturzuweisungen). Mit dem Experiment sollte die Prognosegüte des Modells für die Bestimmung der Wetterlagen eines konkreten Tages im Jahresverlauf getestet werden. Im Ergebnis wiesen die im Experiment berechneten Wetterklassen beider Modellvarianten gegenüber den Messdaten (NCEP/NCAR-Datensatz) eine neunzig-prozentige Prognoserate für die Temperatur und eine achtzig-prozentige für den Niederschlag auf.¹⁰ Darüber hinaus zeigte das Experiment in Hinblick auf die Evaluierung des gekoppelten Modells, dass die „relativen Häufigkeiten der Wetterlagen aus den ECHAM5/MPI-OM1 Modelldaten im Vergleich zu den NCEP/NCAR-Reanalysen deutlich zu kälteren Wetterlagen hin verschoben [waren]. Dies kann hauptsächlich durch den systematischen Fehler im ECHAM5/MPI-OM1 Modell begründet sein, welcher einen so genannten ‚cold bias‘ über Eurasien ver-

10 Der NCEP/NCAR-Datensatz ist ein Referenzdatensatz des US-amerikanischen NCEP National Centers for Environmental Prediction und dem NCAR National Center for Atmospheric Research, der eine modellbasierte Reanalyse von Messdaten für einen bestimmten Zeitraum zusammenstellt (vgl. NCEP/NCAR 2009: Reanalysis).

ursacht. Das bedeutet, dass das gekoppelte Modell generell über Europa zu kalt ist. Der Temperaturfehler kann bis zu -10°C über Eurasien betragen. Dieser systematische Fehler wirkt sich besonders im Winter auf die Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen des ECHAM5/MPI-OM1 Modells aus“ (Sillmann 2003: 28).

Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich dann nach Ursachen für diesen ‚cold bias‘ suchen, um das Modell zu verbessern. Aber das Experiment gab noch weitere Einblicke in das Modellverhalten. Interessanter Weise zeigte sich, dass die Szenarienläufe des gekoppelten Modells die Wetterlagen schlechter repräsentieren als die Szenarienläufe des ungekoppelten Atmosphärenmodells. Darüberhinaus wurde deutlich, dass die Wahl des Zeitpunkts für das Ausschreiben der Ergebnisdaten der Szenarienläufe (0 UTC, 12 UTC) auf die Berechnung der gemittelten maximalen Temperatur einen wesentlich größeren Einfluss hatten als auf die ebenfalls untersuchten Niederschlagswerte. Der Versuch, diese Ergebnisse zu verstehen, vermittelt einen Eindruck von der Komplexität des Experimentierens mit in-silico Experimentalsystemen.

„Die Wetterlagen im Temperaturregime werden vor allem durch die Schichtdicke 1000/850 hPa und 1000/700 hPa bestimmt. Diese auch als relative Topographie bezeichnete Schichtdicke wird wiederum vom Tagesgang der Temperaturen beeinflusst. Da die veränderte Schichtdicke direkt Einfluss auf die Berechnung der Wetterlagen nimmt, können Unterschiede im Tagesgang der Temperaturen bzw. der Veränderung der relativen Topographie in den ECHAM-Modellversionen zu unterschiedlichen Ergebnissen in der eindeutigen Zuordnung der Wetterlagen im Wetterlagenklassifizierungsmodell führen. Besonders im Frühling und Sommer treten größere Differenzen zwischen Tag- und Nachttemperaturen auf, so dass in diesen Jahreszeiten der Temperaturunterschied zwischen 0 und 12 UTC bemerkbare Unterschiede in der eindeutigen Wetterlagenzuordnung hervorruft. Das Modell ECHAM5/MPI-OM1 weist eine höhere Sensitivität in diesen Vorgängen auf. Veränderungen in dieser Modellversion hinsichtlich der Parametrisierung einiger Prozesse, wie Wolkenbildung, saisonale Vegetation und Albedo wirken sich eventuell stark auf die Tages- und Nachttemperaturen aus und beeinflussen so die geopotentielle Höhe bzw. relative Topographie“ (Sillmann 2003: 60).

Ähnlich wie in den Laboren der Biologen sind die experimentellen Ergebnisse Ausgangspunkt für weitere Modifikationen des Experimentalsystems. Denn nur durch Rekonfigurationen von Teilen des Codes sowie neuen Experimenten kann herausgefunden werden, warum beispielsweise die Wahl des Zeitpunkts einen so großen Einfluss auf die Resultate hat. Dies ist nur ein Beispiel der Fehler- und Problemsuche, das während einer Testphase oder auch während der Forschung mit in-silico Experi-

mentalsystemen hervortreten kann. Während jedoch im realweltlichen Labor die Forscher bei „der Konfiguration und Rekonfiguration epistemischer Dinge [...] auf mehr oder weniger hartnäckige Widerstände und Widerspenstigkeiten des Materials, mit dem sie umgehen“ stoßen (Rheinberger 2002: 245), werden die Forscher im Computerlabor mit einer anderen Art von Widerständigkeit konfrontiert. Da aber selbst im biologischen Labor, die „Wissenschaftsobjekte, nicht als materielle Dinge an sich, sondern als epistemisch konfigurierte Objekte“ angesehen werden müssen, hat man es auch hier mit „ständig im Fluß befindlichen transversalen Verkettungen von Darstellungen“ zu tun (Rheinberger 2002: 246). Analog dazu lassen sich die Wissenschaftsobjekte der in-silico Experimentalsysteme ebenso als transversale Verkettungen von Darstellungen charakterisieren.¹¹ Allerdings handelt es sich um codierte Formen von Darstellungen, die anderen Bedingungen unterliegen, wie zu zeigen sein wird.

Story Telling with Code

Ein Klima- oder Erdsystem erhebt den Anspruch, die relevanten klimatischen Prozesse unseres Planeten adäquat zu modellieren. Mit Submodellen und hunderten von Prozessen wird dabei eine bestimmte Geschichte des Klimasystems erzählt, die in der Tradition einer bestimmten Sichtweise der Naturwissenschaft auf das realweltliche Klima steht. Diese Sichtweise hat sich im Laufe der letzten vierhundert Jahre entwickelt und verfeinert. Sie zeigt sich in der Quantifizierung und Mathematisierung realweltlicher Phänomene, in deren Modellierung und, mit der Erfindung der elektronischen Rechenmaschinen, in der Codierung und computerbasierten Ausführung eben dieser Modelle in Form numerischer Prozesse. Die Frage, ob die codierte und computerprozesstierte Sichtweise denselben Bedingungen unterliegt wie die traditionell naturwissenschaftliche – also die mathematisierte und quantifizierte, aber noch nicht algorithmierte und numerisch simulierte – zielt auf den epistemischen Kern des Wandels der Wissenschaft im Zeitalter des Computers. Es erscheint einleuchtend, dass ein weiterer Transformationsschritt sowie der mediale Wechsel in den Computer neue Bedingungen hinzufügen. Welche dies sind, soll am konkreten Beispiel der Parametrisierung stratiformer Wolken anhand der cloud.f90 Datei von ECHAM5 untersucht werden. Dabei werden die mathematische Model-

¹¹ Einzig die materiale Widerständigkeit als experimentelles Korrektiv fehlt in den in-silico Umgebungen. Was dieses experimentelle Korrektiv ersetzt, wird zu klären sein.

lierung und die Codierung des Schmelzvorgangs Q_{mli} von Wolkeneis r_i miteinander verglichen.¹²

Grundsätzlich werden Wolken in globalen Zirkulationsmodellen parametrisiert, da die Auflösung dieser Modelle mit 60 bis 500 Kilometer in der Horizontalen und 16 bis 30 Schichten in der Vertikalen zu grob ist. Wolken fallen buchstäblich durchs Raster der Simulation, denn erst ab circa einem Kilometer lassen sich die für die Wolkenphysik relevanten Bewegungen auflösen. Wolken sind jedoch wichtige Klimafaktoren, denn sie beeinflussen maßgeblich die Strahlungsbilanz sowie den Wasserkreislauf der Atmosphäre. Wolken werden daher in Form subskaliger Parametrisierungen in das Modell integriert. Für ECHAM5 geschieht dies anhand zwei verschiedener Wolkenschemata für konvektive und stratiforme Wolken, wobei letztere in der cloud.f90 Datei beschrieben werden. Das stratiforme Wolkenschema basiert auf den prognostischen Gleichungen der drei Wasserphasen, der Wolkenmikrophysik sowie einem statistischen Wolkenbedeckungsschema. In der Modellbeschreibung, welche die mathematische Modellierung darlegt, werden die ‚governing equations‘ wie folgt beschrieben (vgl. Roeckner et al. 2003).

„The scheme for the representation of stratiform clouds consists of prognostic equations for the vapor, liquid, and ice phase, respectively, a cloud microphysical scheme (Lohmann and Roeckner (1996); with some revisions), and a statistical cloud cover scheme including prognostic equations for the distribution moments (Tompkins, 2002). [...] The governing equations for the grid-cell mean mass mixing ratios of water vapor, r_v , cloud liquid water, r_l , and cloud ice, r_i , are written in symbolic form as follows (units are $\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$$[\text{Änderung des Wasserdampfs } r_v \text{ in Wolken}] \partial r_v / \partial t = Q_{Tv} + Q_{evr} + Q_{evl} + Q_{sbs} + Q_{sbis} + Q_{sbi} - Q_{cnd} - Q_{dep} - Q_{tbl} - Q_{tbi} \quad (10.1)$$

$$[\text{Änderung der Flüssigkeit } r_l \text{ in Wolken}] \partial r_l / \partial t = Q_{Tl} + Q_{mli} + Q_{mlis} + Q_{cnd} + Q_{tbl} - Q_{evl} - Q_{frh} - Q_{fris} - Q_{frc} - Q_{aut} - Q_{racl} - Q_{saci} \quad (10.2)$$

$$[\text{Änderung des Eis } r_i \text{ in Wolken}] \partial r_i / \partial t = Q_{Ti} + Q_{sed} + Q_{dep} + Q_{tbi} - Q_{mli} - Q_{sbi} + Q_{frh} + Q_{fris} + Q_{frc} - Q_{agg} - Q_{saci} \quad (10.3)'' \quad (\text{Roeckner et al. 2003: 61}).$$

Das mathematische Modell gibt gemäß der Modellbeschreibung an, wie die Vorgänge in den stratiformen Wolken konzipiert sind. Daraus leitet sich nun die Modellierung für das programmierte Modell ab. Beispielsweise wird die Wolkenbedeckung als Verteilung von Wasser in den ortsfesten Volumen (grid-cell) modelliert, wobei sich die Ver-

¹² Q_{mli} beschreibt das „instantaneous melting of r_i if the temperature exceeds the freezing point“ (Roeckner et al. 2003: 62).

teilung statistisch-dynamisch berechnen lässt. „The fractional cloud cover can be expressed as [...] probability density function (PDF) of $r_i = r_v + r_l + r_i$ [...] The remaining task is to choose an appropriate PDF and to determine its moments. The choice of the PDF was guided by simulations with a cloud resolving model (CRM) which was run on a horizontal domain of about 90 km x 90 km and 21 km in the vertical (Tompkins, 2002)“ (Roeckner et al. 2003: 63). Die Varianz resultiert aus den prognostischen Gleichungen, welche die Produktion, den turbulenten Transport und die Dissipation der Varianz berücksichtigen. Das mikrophysikalische Schema beschreibt die Änderungen der Wasserphasen sowie verschiedene Niederschlagsprozesse. In Abschnitt 10.3.3 der ECHAM5 Modellbeschreibung wird das ‚freezing of cloud liquid water and melting of cloud ice‘ beschrieben:

„At temperatures $T < -35^\circ\text{C}$, the total amount of cloud liquid water freezes homogeneously and instantaneously, during one time step Δt , to cloud ice Levkov et al. (1992) so that

$$Q_{frh} = r_l / \Delta t \quad (10.40).$$

For stochastic and heterogeneous freezing in the temperature range $-35^\circ\text{C} \leq T < 0^\circ\text{C}$, we use the extrapolated equation by Bigg (1953) down to the cloud droplet size (Levkov et al., 1992; Murakami, 1990).

$$Q_{frs} = C_{a1} \{ \exp[b_1 (T_0 - T)] - 1 \} p r_l^2 / p_w N_l \quad (10.41)$$

where the constants $a_1 = 100 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ and $b_1 = 0.66 \text{ K}^{-1}$ are taken from laboratory experiments, $T_0 = 273.15 \text{ K}$ is the freezing point, $p_w = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ is the density of water, ρ the air density, T the grid-cell mean temperature, r_l the in-cloud liquid water mixing ratio, N_l is the cloud droplet number concentration, and C the fractional cloud cover. In the standard version of ECHAM5, N_l is prescribed within the atmospheric boundary layer ($= 220 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$ over land and $80 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$ over sea, respectively). Above the boundary layer, N_l decreases exponentially to 50 m^{-3} in the upper troposphere over both land and ocean.

Brownian diffusion contact nucleation results from random collisions of aerosol particles with supercooled cloud droplets. It may be written as (e.g. Levkov et al. (1992))

$$Q_{frc} = C m_{io} F_1 D F_{ar} \quad (10.42)$$

where $m_{io} = 10^{-12} \text{ kg}$ is the initial mass of a nucleated ice crystal, $D F_{ar} = 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ the aerosol diffusivity (Pruppacher and Klett, 1978), and $F_1 = (4\pi R_{vl} N_l N_a) / \rho$. The concentration of active contact nuclei is approximated as $N_a = \max[N_{ao}(T_0 - T - 3), 0]$, with $N_{ao} = 2 \cdot 10^5 \text{ m}^{-3}$, and the mean volume droplet radius, R_{vl} , is obtained from

$$4/3\pi R_{vl}^3 N_l \rho_w = r_{lp} \quad (10.43)$$

Following Levkov et al. (1992), cloud ice is assumed to melt completely when $T > T_0$, giving

$$Q_{mli} = r_i / \Delta t \quad (10.44)''$$

(Roeckner et al. 2003: 69, 70).

Die Umsetzung des Schemas für stratiforme Wolken in der cloud.f90-Datei setzt sich aus verschiedenen Teilprozessen zusammen, die nacheinander abgearbeitet werden, wie die Kommentare der einzelnen Abschnitte des Programms der cloud.f90-Datei angeben. Der Schmelzvorgang Q_{mli} für die eingehende Niederschlagsmenge in den stratiformen Wolken ist unter Punkt 3.1 programmiert. Die Prozessabläufe der Datei lassen sich mit einem Flow Chart visualisieren, wie in Abbildung 16 dargestellt. Der Prozess des Schmelzvorgangs ist im Flow Chart mit einem Pfeil markiert.

„SUBROUTINE cloud

1. Top boundary conditions, air density and geopotential height at half levels
 - 1.1 Set to zero precipitation fluxes etc.
 - 1.2 Air density
 - 1.3 Geopotential at half levels
2. Set to zero local tendencies (increments)
3. Modification of incoming precipitation fluxes by melting, sublimation and evaporation
 - 3.1 Melting of snow and ice**
 - 3.2 Sublimation of snow and ice (Lin et al., 1983)
 - 3.3 Evaporation of rain (Rotstayn, 1997)
4. Sedimentation of cloud ice from grid-mean values. Updating the tendency 'pxite' to include sedimentation. At $jk=klev$, the sedimentation sink is balanced by precipitation at the surface (through 'zzdrs', see 7.3). Finally: In-cloud cloud water/ice.
5. Condensation/deposition and evaporation/sublimation
 - 5.1 Turbulence: Skewness - equation solved implicitly. This solver only works if phmixtau has non-zero timescale
 - 5.2 Turbulence: variance - equation solved implicitly
 - 5.3 Deposition/sublimation of cloud ice and condensation/evaporation of liquid water due to changes in water vapour and temperature (advection, convection, turbulent mixing, evaporation of rain, sublimation and melting of snow). Translate PDF laterally to calculate cloud after one timestep

- 5.4 Accounting for cloud evaporation in clear air and checking for supersaturation
 - 5.5 Change of in-cloud water due to deposition/sublimation and condensation/evaporation (input for cloud microphysics)
 - 6. Freezing of cloud water
 - 6.1 Freezing of cloud water for $T < 238$ K
 - 7. Cloud physics and precipitation fluxes at the surface
 - 7.1 Warm clouds: Coalescence processes after Beheng (1994): Auto-conversion of cloud droplets and collection of cloud droplets by falling rain. Accretion of cloud droplets by falling snow (zsac1) is calculated under 7.2
 - 7.2 Cold clouds: Conversion of cloud ice to snow after Levkov et al. 1992: Aggregation of ice crystals to snow and accretion of ice by falling snow. Accretion of cloud droplets by falling snow. Effective radius of ice crystals after Moss (1995)
 - 7.3 Updating precipitation fluxes. In the lowest layer (klev), the sedimentation sink of cloud ice is balanced by precipitation at the surface (through 'zzdrs'). Fraction of precipitating clouds (zclcpre) used for the calculation of evaporation/sublimation of rain/snow in the next layer
 - 8. Updating tendencies of t, q, xl, xi and final cloud cover
 - 8.10 Cloud cover scheme tendencies
 - 8.11 Simple linearized effect of microphysics on skewness
 - 8.2 New skewness and variance
 - 8.3 Tendencies of thermodynamic variables Attn: The terms zxisub and zximlt do not appear in pxite because these processes have already been included in pxite via changes in cloud ice sedimentation (see 3.1, 3.2 and 4)
 - 8.4 Corrections: Avoid negative cloud water/ice
 - 9. Diagnostics
 - 9.1 Accumulated precipitation at the surface
 - 9.2 Total cloud cover
 - 9.3 Vertical integrals of humidity, cloud water and cloud ice
- END SUBROUTINE cloud“
- (MPI-Met 2005: cloud.f90, Kommentare)

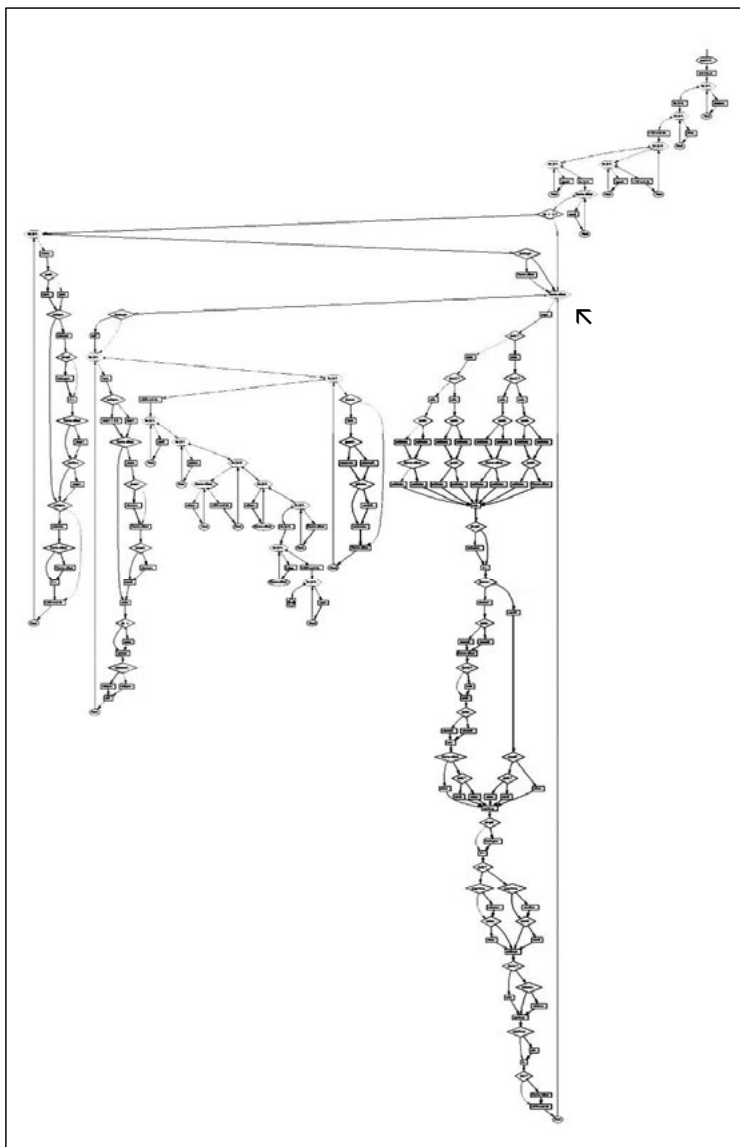


Abbildung 16: Flow Chart der Prozessabläufe der cloud.f90-Datei.
Der Pfeil markiert den Schmelzvorgang 3.1 (MPI-Met 15. Juli 2005)


```

! 3. Modification of incoming precipitation fluxes by
! melting, sublimation and evaporation
!
285: IF (jk .GT. 1) THEN
!
! DIR$ CONCURRENT
! DO 331 j1 = 1,kpoma
!
290: ! 3.1 Melting of snow and ice
!
      zcons  = zcons2*zdp(j1)/(zlsdcp(j1)-zlvdcp(j1))
      ztdif  = MAX(0.0,ptml(j1,jk)-tmelt)
      zsnm1t = MIN(zxsec*zsfl(j1),zcons*ztdif)
295:   zrfl(j1) = zrfl(j1)+zsnm1t
      zsfl(j1) = zsfl(j1)-zsnm1t
      zsm1t(j1) = zsnm1t/(zcons2*zdp(j1))
      zximelt = MIN(zxsec*zxiflux(j1),zcons*ztdif)
      zxiflux(j1)=zxiflux(j1)-zximelt
300:   zxim1t(j1) =zximelt/(zcons2*zdp(j1))
      IF (ztdif.GT.0.0) THEN
        zim1t(j1) = MAX(0.0,pxim1(j1,jk)+pxite(j1,jk)*ztmst)
      ELSE
        zim1t(j1) = 0.0
305:   END IF

```

Abbildung 17: Programmierung des Schmelzvorgangs in der *cloud.f90* Datei des Atmosphärenmodells ECHAM5 (MPI-Met 15. Juli 2005)

Die Programmierung, die nun dem Kommentar in ‚3.1 Melting of snow and ice‘ folgt, ist in Abbildung 17 dargestellt. Sie beschreibt explizit die Vorgänge, welche im mathematischen Modell in allgemeiner Form notiert sind. Um das Programm tatsächlich zum Laufen zu bringen, muss die mathematische Beschreibung in eine konkrete Narration übersetzt werden. Im Falle des Schmelzens von Eis entspricht der mathematische Term Q_{mli} dem Ausdruck (zsnm1t) in Codezeile 294. Der Wert für (zsnm1t) wird im Programm durch eine Minimum-Funktion¹³ aus den beiden Argumenten (1) vorhandenes Eis/Schnee (zxsec*zsfl(j1)) und (2) Temperaturänderung (zcons*ztdif) gewonnen, analog der mathematischen Beschreibung in Formel 10.44: $Q_{mli} = r_i/\Delta t$, welche die Schmelzrate als Veränderung des Wolkeneises im Laufe der Zeitveränderung beschreibt.¹⁴ Um die konkrete Parametrisierung im Rahmen des Teilprozesses „3. Modification of incoming precipitation fluxes by melting, sublimation and evaporation“ zu programmieren, bedarf es folgender Spezifikationen: (1) zxsec*zsfl(j1): Wie viel Eis/Schnee (zsfl) ist in einer

13 Minimum- und Maximumfunktionen sind Funktionen zur Auswahl eines Wertes von zwei Werten. Die Funktion liefert dann einen Wert zurück: den kleinsten oder größten.

14 Zu beachten ist, dass die Schmelzrate von Wolkeneis Q_{mli} wiederum selbst ein Teil des Terms zur Berechnung des Wolkeneises ist: [Änderung der Flüssigkeit r_l in Wolken] $\partial r_l / \partial t = Q_{rl} + Q_{mli} + Q_{mlis} + Q_{end} + Q_{tbl} - Q_{evl} - Q_{frh} - Q_{frs} - Q_{fre} - Q_{aut} - Q_{rac1} - Q_{sac1}$ (10.2).

Schicht (jl) vorhanden, das überhaupt schmelzen kann (zsfl (jl))? Der Wert ergibt sich aus den vorhergegangenen Berechnungen des Wolken-eises (zsfl). Um jedoch zu verhindern, dass der Wert des verfügbaren Eises null sein kann – denn dies würde bei einer Division zu mathematischen Problemen führen – wird dieser mit einem Sicherheitsfaktor (zxsec) multipliziert, der etwas kleiner als 1 ist und sich wie folgt ergibt: $zxsec = 1.0 - zepsec$, wobei $zepsec = 1.0e^{-12}$ ist, also $1,0 - 1,0 \cdot 10^{-12}$.¹⁵

(2) (zcons*ztdif): Welche Temperaturveränderung (ztdif) liegt konkret vor, um das Schmelzen nun in Gang zu bringen? In anderen Worten: Wie viel Energie steht für das Schmelzen von Eis zur Verfügung? Die Temperaturveränderung wurde in der vorhergehenden Codezeile 293 als Maximum-Funktion wie folgt berechnet: $ztdif = \text{MAX}(0.0, ptm1(jl,jk) - tmelt)$. Dabei ergibt sich die Temperaturveränderung aus dem Eingabewert der Temperatur (ptm1) zwischen zwei Schichten (jl, jk), der entweder zu Beginn aus Messungen stammt oder im Laufe der Simulation einen Zeitschritt zuvor berechnet wurde, abzüglich der Schmelztemperatur (tmelt) von 273,15 Kelvin, also 0° Celsius. Als Maximum-Funktion kann die Temperaturveränderung (ztdif) an dieser Stelle im Code nie unter 0° Celsius sinken.

Die so berechnete Temperaturveränderung wird mit einer Konstante (zcons) multipliziert, die ebenfalls zwei Codezeilen zuvor, in Zeile 292, berechnet wurde: $zcons = zcons2 * zdp(jl) / (zlsdcp(jl) - zlvdcp(jl))$. Diese Konstante (zcons) wird als Verhältnis von $(zcons2 * zdp(jl))$ zu $(zlsdcp(jl) - zlvdcp(jl))$ angegeben, wobei $zcons2 = 1. / (ztmpst * g)$ sich aus dem Verhältnis von 1 zur Zeitschrittweite (ztmpst) von $1 / \Delta t$ multipliziert mit der Gravitationsbeschleunigung (g) von $9,80665 \text{ m/s}^2$ ergibt. Das Ganze (zcons2) wird dann mit der Dicke (zdp) der Schicht (jl) multipliziert ($zcons2 * zdp(jl)$). Der zweite Teil des Ausdrucks $(zlsdcp(jl) - zlvdcp(jl))$ berechnet als erstes den Wert der Sublimationswärme ($zlsdcp(jl)$), der sich an anderer Stelle in der Datei als $zlsdcp = als * zrcp$ ergibt, also als Sublimationswärme (als) von 2.8345^6 J/kg multipliziert mit dem Wert der spezifischen Feuchte und Wärme (zrcp), der ebenfalls in der Datei an anderer Stelle als $zrcp = 1. / (cpd + zcons1 * \text{MAX}(pqm1(jl,jk), 0.0))$ berechnet wird.¹⁶ Von dem so

15 Der Wert des verfügbaren Eises wird null, wenn im Laufe der Berechnungen zwei gleiche Größen miteinander dividiert werden. Um diesen Fall im weiteren Verlauf zu vermeiden, wird der ‚security parameter‘ (zxsec) an dieser Stelle eingeführt. Insgesamt gibt es in dieser cloud.f90-Datei drei verschiedene Sicherheitsparameter.

16 $zrcp = 1. / (cpd + zcons1 * \text{MAX}(pqm1(jl,jk)$ stellt das Verhältnis von 1 zur spezifischen Wärme trockener Luft bei konstantem Druck (cpd) von $1005,46 \text{ J/K/kg}$ addiert mit der Konstante (zcons1) dar. $zcons1 = cpd * vtmpc2$ wiederum ist das Produkt der spezifische Wärme trockener

errechneten Wert der Sublimationswärme ($zlsdcp(jl)$) wird nun der Wert der Verdunstungswärme ($zlvdcp(jl)$) subtrahiert, der sich als Produkt ($alv * zrcp$) der latenten Wärme bei Verdunstung (alv) von 2.5008^6 J/kg multipliziert mit ($zrcp$), wie bereits beschrieben, ergibt.

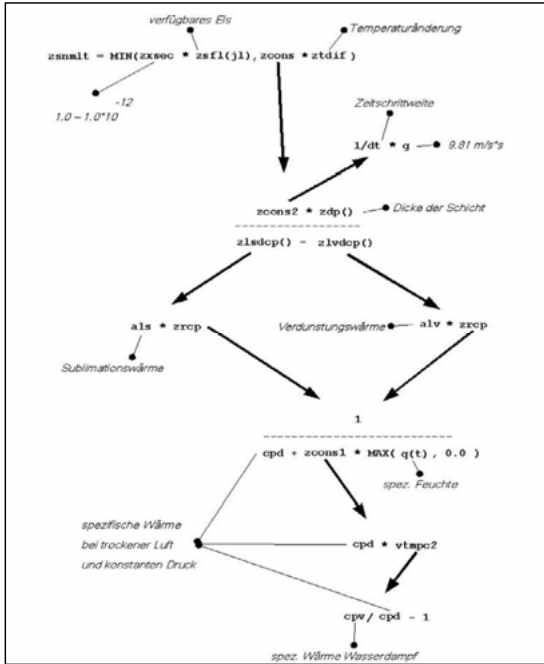


Abbildung 18: Schmelzvorgang (Codezeile 292 bis 294) der cloud.f90 Datei des Atmosphärenmodells ECHAM5 (MPI-Met 15. Juli 2005)

Der ausbuchstabierte Code der Zeilen 292 bis 294 der cloud.f90-Datei, wie in Abbildung 18 dargestellt, errechnet das Resultat des Schmelzvorganges, um dann in Codezeile 295 ($zrfl(jl) = zrfl(jl) + zsmnlt$) das zum Berechnungszeitpunkt in der Wolke enthaltene Wasser ($zrfl$) aus dem bislang verfügbaren Wolkenwasser zuzüglich des geschmolzenen Eises zu berechnen. Analog dazu wird in Codezeile 296 ($zsf1(jl) = zsf1(jl) -$

Luft bei konstantem Druck multipliziert mit der dimensionslosen Konstante ($vtmpc2 = cpw/cpd - 1$), ergibt sich aus dem Verhältnis der spezifischen Wärme von Wasserdampf bei konstantem Druck (cpw) von 1869,46 J/K/kg zur spezifischen Wärme trockener Luft bei konstantem Druck minus 1. Der Ausdruck ($cpd + zcons1$) wird schließlich mit ($\max(pqm1(jl,jk), 0.0)$) multipliziert, wobei ($pqm1$) die maximale spezifische Feuchte bezeichnet, welche als Wert dem Modell vorgegeben wurde.

zsnmlt) das aktuelle Wolkeneis (zsfl) aus dem bisher verfügbaren Wolkeneis (zsfl) minus dem geschmolzenen Eis (zsnmlt) berechnet. Während der Berechnung wird mit Werten aus Konstanten, aus Eingabedaten – durch Messung bei der Initialisierung vorgegeben oder im Zeitschritt zuvor berechnet – und aus temporären Daten, die erst im Laufe der weiteren Berechnung neu berechnet werden, gearbeitet. Ziel der Datei ist es, Ausgabewerte für Schnee, Regen, Temperatur und Wolkenbedeckung zu errechnen. Diese Werte werden dann für die weiteren Berechnungen des Atmosphärenmodells verwendet.

Der Zoom in den Code macht deutlich, dass das Programm – im Unterschied zum mathematischen Modell – eine explizite Geschichte erzählt, welche für die Berechnung mit numerischen Werten konkretisiert wird. Dies ist mit ‚story telling with code‘ gemeint. Die Geschichte von Codezeile 292 bis 296 in Prosa erzählt, lautet: Wenn sich das Verhältnis von Druck, Sublimations- und Verdunstungswärme sowie Feuchtigkeit verändert (Zeile 292), dann verändert sich die Temperatur in der Wolkenschicht (Zeile 294). Falls die Temperatur dabei über den Gefrierpunkt steigt (Zeile 293), schmilzt das Wolkeneis (Zeile 294) und das Verhältnis von Eis und Wasser in der Wolkenschicht verändert sich im Unterschied zum vorherigen Zeitschritt (Zeilen 295, 296). Bei ausreichender Menge und Schwere der Wassertropfen, fängt es unter entsprechenden Umständen an zu regnen. Der Schmelzvorgang wird für jede Gitterbox und für alle Schichten des Modells berechnet und ist nur einer von zahlreichen Prozessen der Wolkendatei, die insgesamt 1.110 Zeilen Code umfasst. Um die Geschichte numerisch erzählen, also simulieren zu können, wird jeder Konstante ein numerischer Wert zugewiesen und für jede Variable gilt es, eine konkrete Berechnungsprozedur anzugeben, die mit Messwerten oder berechneten Werten des Zeitschritts zuvor initialisiert wird. Die Berechnungsprozedur entspricht dabei nicht eins zu eins dem mathematischen Modell. „Die eigentliche Parametrisierung,“ wie ein Klimaforscher im Interview erklärte, „muss man sich aus dem Quellcode herausziehen“ (Interview 18, 2005). Genau hier liegt die Arbeit des Modellierers, denn das mathematische Modell beschreibt die konzeptuelle Herangehensweise in einer wesentlich allgemeineren Version als der Code. Daher sind das mathematische Modell auf dem Papier und das programmierte Computermodell nicht identisch, zumal das Computermodell mit einer diskretisierten, computertauglichen Version des mathematischen Modells arbeitet. Diese Version unterliegt Verzerrungseffekten, wie beispielsweise, dass die verschiedenen Ströme eines Klimamodells von Schicht zu Schicht springen und sich nicht kontinuierlich bewegen. Am folgenden Beispiel der Fehlersuche im Modell werden einige dieser Verzerrungseffekte deutlich.

Fehlersuche im Modell

Bei der Vielzahl der Prozesse eines Modells, in welchen sich die verschiedenen Konstanten und Variablen oft wiederholen, ist es nicht einfach, den Überblick zu behalten. Daher können sich leicht Fehler in die Programmierung einschleichen. Diese Fehler zu erkennen, ist nicht nur schwierig, sondern mühsam und zeitaufwendig. Die Fehlersuche ist jedoch ein wichtiger Teil der Modellierungsarbeit, denn jeder Fehler kann mehr oder weniger großen Einfluss auf die Resultate und damit auf die Erklärungs- und Prognosegüte des Modells haben. Letztendlich ist es die Güte eines in-silico Experimentalsystems, welche die Evidenz der gewonnenen Ergebnisse garantiert. Anhand der Fehler zeigt sich aber auch die Diskrepanz zwischen mathematischem Modell und Programm. Diese Diskrepanz ist Ausdruck der Zugeständnisse an die Logik der Rechner und lässt die Eigenart der Beschaffenheit dieser in-silico Experimentalsysteme zu Tage treten.

Ein Beispiel für eine zwei Jahre andauernde Modellentwicklung mit einer nahezu einjährigen Fehlersuche ist die Modellierung eines Vulkanausbruchs im Atmosphärenmodell ECHAM5. Dabei handelt es sich nicht um die Modellierung einer Vulkaneruption, sondern um die Simulation der Freisetzung langlebiger Stoffe wie Asche und Schwefeldioxid in der Stratosphäre und den Folgen für das Klima. „Eine Vulkanexplosion sieht bei uns so aus, dass es in einer Gitterbox in der Stratosphäre, also etwa in 25 Kilometer Höhe, ‚pluppt‘ macht und dann ist da auf einmal ganz viel Asche und Schwefeldioxid“ (Interview 25, 2008). Vorbild für die Lokalisierung der Gitterbox, die Höhe der Freisetzung, die zeitliche Entwicklung wie auch die Menge der freigesetzten Stoffe war der Ausbruch des philippinischen Vulkans Pinatubo im Juni 1991.¹⁷ Er diente als Beispiel, um die Modellierung zu evaluieren. Allerdings waren für das Modell nur feine Asche und Sulfataerosole von Interesse, da sich diese länger in der Atmosphäre halten und daher einen klimarelevanten Einfluss haben. Dieser Einfluss entfaltet sich in den chemischen und physikalischen Prozessen infolge der Emission. Das freigesetzte Schwefeldioxid wird in der Atmosphäre in gasförmiges Sulfat und weiter in Sulfat-Aerosole umgewandelt. Die Aerosole werden von den

¹⁷ Der Ausbruch des Pinatubo zog sich vom 7. bis 15. Juni 2001 hin, mit einer Haupteruption am 15. Juni. Bei dieser wurden 100 Mega Tonnen Asche und Staub, ca. 1% der gesamten Eruptionsmasse, und 17 Megatonnen Schwefeldioxid in die Stratosphäre geschleudert, die sich drei Jahre lang als Wolken in der Stratosphäre hielten und die Sonneneinstrahlung reduzierten. Das führte zu einem globalen Temperaturabfall von 0,4 °C und zur Verringerung des Ozons.

atmosphärischen Strömungen transportiert. Sie beeinflussen die Strahlungsbilanz und damit die meteorologischen Prozesse. Die Programmierung der Freisetzung von Asche und Schwefeldioxid in der Stratosphäre erfolgte im Rahmen des bestehenden Atmosphärenmodells ECHAM5 sowie des Aerosolmodells HAM, wobei die chemischen und aerosolmikrophysikalischen Prozesse mit Hilfe von HAM und die Transportprozesse der Aerosole mit ECHAM5 berechnet wurden.

„Also man könnte in ECHAM beispielsweise angeben, dass man nur mit passiven Tracern rechnet, wie z.B. feiner Asche, die nicht chemisch reagiert sondern nur emittiert und vom Modell transportiert wird und in Form von Absinkprozessen, also Sedimentations- und Depositionsprozessen aus der Atmosphäre entfernt wird. Weiter gibt es zusätzlich die Möglichkeit mit HAM, also mit dem Aerosol-Modell zu rechnen. HAM hat fest definierte Tracer (Schadstoffe). Das ist Staub, Seesalz, Ruß, also ‚Black Carbon‘ und ‚Organic Carbon‘, Sulfat. [...] Oder man rechnet mit Chemie, die umfasst bis zu hundertfünfzig Reaktionen und sechzig verschiedene Tracer, also sechzig verschiedene chemische Stoffe. (Und HAM oder das Chemiemodell geben die Ergebnisse dann an ECHAM weiter?) Ja, HAM berechnet nur die Aerosolmikrophysik, also die Umwandlung von gasförmig ins Aerosol und die Reaktion der Teilchen untereinander. Am Anfang entstehen kleine Teilchen, die wachsen mit der Zeit. Das passiert alles in HAM. Aber alle meteorologischen Prozesse, sprich der Transport, auch die Wechselwirkung mit Wolkenwasser und Regen, geschieht in ECHAM. Entsprechendes gilt auch für die Chemie. Die Chemie berechnet die Reaktionen der Stoffe untereinander, aber der Transport findet in ECHAM statt. [...] Im Prinzip haben wir in ECHAM je eine Variable für diese Tracer. Zu jedem Zeitpunkt und in jeder Gitterbox wird die Veränderung der Konzentration (Deltas), z.B. durch Transport oder Emission, ausgerechnet. Für die Vulkaneruption geben wir die gesamte emittierte Masse und die Eruptionszeit vor und berechnen daraus einen Fluss, also wie viel pro Sekunde emittiert wird. Die emittierte Konzentration pro Zeitschritt addieren wir auf das Delta, welches schon Konzentrationsänderungen durch andere physikalische Prozesse aus HAM und ECHAM enthalten kann. Am Ende des Zeitschrittes wird die Änderung der Konzentration, also das Delta, auf die Konzentration des Tracers in ECHAM aufaddiert. Der Tracer ist schon im Modell enthalten“ (Interview 25, 2008).¹⁸

Allerdings zeigte sich schnell, dass die Berechnungen nicht stimmten. „Es wurde viel zu viel Schwefeldioxid (SO₂) in Sulfat umgewandelt und

18 „Zu dem Tracer SO₂ (Schwefeldioxid) fügt man eine gewisse Menge hinzu, so wie das am Boden für alle anderen Emissionen auch gemacht wird. Das ist fast das gleiche nur sind es Emissionen vom Straßenverkehr oder Waldbrände. Bei uns ist der Vulkan und es ist in einer ganz anderen Höhe“ (Interview 25, 2008).

das SO_2 hatte eine viel zu geringe Lebensdauer. Wir hatten eine Lebensdauer von knapp 14 Tagen und wir brauchten eigentlich eine von gut 30 Tagen“ (Interview 25, 2008), wie die empirischen Daten des Pinatubo-Ausbruchs vorgaben.¹⁹ Die Fehlersuche konzentrierte sich daher zunächst auf den Umwandlungsprozess von Schwefeldioxid in Sulfat und anschließend auch auf die Lebensdauer des Sulfats, denn „das Sulfat fiel [im Computerexperiment] wie Steine vom Himmel. Anstatt einem halben Jahr Halbwertszeit waren es bei uns nur ein paar Wochen. [...] Das legte die Vermutung nahe, dass es eventuell zu große Teilchen waren. Dann die Frage: Warum?“ (Interview 25, 2008). Um die Fehlerquellen zu entdecken, benötigten die Modellierer fast ein Jahr Detektivarbeit. Es wurden Vermutungen aufgestellt, überprüft und wieder verworfen bis die Fehler gefunden waren und behoben werden konnten.

„Das eine Problem war, dass sich die Vulkanwolke in dieser großen Höhe in der Stratosphäre befindet. 25 km, oder 30 bis 50 hPa, das ist eine Höhe, die in einem normalen Modell an der Obergrenze ist. Deswegen mussten wir eine andere Modellversion nehmen, nämlich das Modell der Mittleren Atmosphären, und das wurde zuvor noch nie mit HAM gekoppelt. Da HAM keine eigene Chemie rechnet, muss man beispielsweise die Konzentration der Hydroxyl-Radikale (OH) dem Modell vorgeben, um Schwefeldioxid (SO_2) umzuwandeln. Wir brauchten also neue Daten, die diese Höhe miterfassten und die waren erstmal nicht in Ordnung. Es hat relativ lange gedauert, um genau herauszufinden: Da ist der Fehler! Die [Mengen] waren um den Faktor zwei zu groß und dadurch wurde viel zu viel Schwefeldioxid in Sulfat umgewandelt, wodurch die viel zu geringe Lebensdauer entstand. [...] Nachdem wir dann wussten, ok das Schwefeldioxid hat die Lebenszeit wie wir sie haben wollen, wurde genauer auf das Sulfat geschaut. Dabei merkten wir, das Sulfat fiel wie Steine vom Himmel. [...] Wir haben in den Prozessen der Sedimentation [von ECHAM] gesucht, da wir vermuteten, vielleicht ist hier etwas nicht in Ordnung, z.B. ungenaue numerische Prozesse. [...] Die Sedimentation beschreibt über die Fallgeschwindigkeit, wie schnell und wie viele Teilchen nach unten fallen. Das Ergebnis hängt von der Modellauflösung ab, wie viele einzelne vertikale Schichten man hat. Innerhalb einer Schicht wird alles als gleich verteilt angenommen: Ein Teilchen, oder eine bestimmte Menge, kommt von oben herunter und wird als gleichverteilt in dieser Box angesehen. D.h. es kommt ganz schnell etwas unten in der Box an und kann im nächsten Zeitschritt schon in die nächste Box fallen, während es in Wirklichkeit noch weiter

19 „Wir haben alles am Pinatubo validiert. Wir wissen ungefähr wie groß die Teilchen werden und auch wie lange sich die Sulfate in der Stratosphäre halten bzw. welche Wechselwirkungen mit der Strahlung stattfinden. Dafür gibt es gemessene Werte und die können wir natürlich vergleichen“ (Interview 25, 2008).

oben bliebe und die ganze Schicht langsam durchwandern müsste. So eine Schicht ist ca. zwei Kilometer hoch. Wenn man nun statt mit 39 Schichten mit 90 rechnet, sieht man einen deutlichen Unterschied. Man hat dreimal so viele Schichten und die Teilchen fallen dadurch langsamer.

Aber wir haben gesehen, das war es nicht! Wir merkten, dass auch mit der höheren Auflösung die Konzentration der Teilchen immer noch viel zu schnell abnahm. Sie waren alle immer viel zu schnell weg. In den Ergebnissen ließ sich anhand von Plots erkennen, dass eine Aerosolwolke schnell nach unten wanderte. Wir machten Abbildungen mit zweidimensionalen Schnitten durch das Modellgebiet und konnten sehen, wie der Durchmesser der Teilchen schnell größer wurde und dass sie einfach zu groß waren. Dann wurde relativ schnell klar, dass es ein Problem in der Aerosolmikrophysik [des HAM Modells] sein musste. [...] Ein Kollege machte dann den Vorschlag, dass es ein Boxmodell für HAM gab. Das rechnet nur eine Gitterbox aus. Das ist natürlich viel einfacher, viel schneller. Man kann viel direkter sehen, was passiert. Mit diesem Boxmodell haben wir dann auch erkannt, dass etwas nicht richtig funktionierte, dass ein physikalischer Prozess überhaupt nicht angesprochen wurde, weil wir außerhalb des Gültigkeitsbereiches waren. Wir hatten das als Effekt eigentlich im Prinzip schon immer gesehen, auch vorher, da in unserer Wolke in der Mitte irgendwie immer ein Loch mit sehr niedrigen Konzentrationen war. [...] Mit dem anderen [Boxmodell] konnte man ganz schnell mal Schalter im Code ein- und ausschalten und sehen, was passiert. Und dann stellte ich fest, hier stehen nur Nullen. Wir haben dann eine finnische Kollegin, die für diese Nukleationsprozesse – das war das eben – verantwortlich war, angeschrieben und ihr das Problem erklärt. Sie hat uns Formeln und auch ein bisschen Code geschickt und meinte, wir sollten es mal damit versuchen. Das habe ich dann für uns passend umgesetzt und danach merkten wir schon: Ja, es wird besser! Es war aber noch nicht gut. Also mussten wir natürlich weiter suchen. Man hat immer wieder überlegt, was es denn sein könnte? Was kann man denn noch machen? Immer wieder hatte jemand eine Idee. Dann schmeißt man das Modell wieder an und probiert es nochmal. Und sieht im Ergebnis wieder: Es hat nichts gebracht. Das war ziemlich frustrierend“ (Interview 25, 2008).

Der Durchbruch ergab sich schließlich, als sich herausstellte, dass es im Institut vier verschiedene Boxmodelle der Aerosolmikrophysik gab. HAM, das Teil von ECHAM war, das Boxmodell (B2) des Kollegen, das bereits für Vergleiche mit HAM in Tests verwendet worden war, sowie zwei weitere Modelle (B3, B4). „Ein Kollege war dabei, eine andere Mikrophysik in ECHAM einzubauen und dazu gab es auch ein Boxmodell [B3]. Und schließlich hatte eine Kollegin ursprünglich auch mal ein Mikrophysikmodell geschrieben, und dazu gab es ebenfalls ein Boxmodell [B4]“ (Interview 25, 2008). Charakteristische Ergebnisse, die sich aus der Simulation mit HAM ergeben hatten, wurden nun mit allen vier

Boxmodellen getestet. Die Ergebnisse unterschieden sich erheblich von HAM und es zeigten sich verschiedene Hinweise zur Lösung des Problems. „Wir stellten fest, dass wir sehr stark vom Zeitschritt abhängen. Das galt nicht nur für uns (HAM), das galt zum Teil auch für die anderen Modelle“ (Interview 25, 2008). Darüber hinaus wurde deutlich, dass die verschiedenen Teilchengrößen (Moden) des Sulfats im HAM Modell „sehr schön für die Troposphäre sind, dass es aber überhaupt nicht der Situation in der Stratosphäre entspricht. Und überhaupt nicht der Situation, die sich mit so einem Vulkan ergibt“ (Interview 25, 2008). Die Resultate des HAM Modells ergaben eine breite Kurve der Teilchengröße im Verhältnis zur Anzahl der Teilchen und wiesen damit auf die Bildung sehr kleiner als auch sehr großer Teilchen hin. „Und die viel größeren fielen eben wie Steine vom Himmel. Dadurch haben wir so viel Masse verloren“ (Interview 25, 2008). Im Unterschied dazu ergaben die Resultate des Boxmodells B2 eine schmale Kurve, also einen schmalen Bereich von Teilchengrößen.

„Dann haben wir angefangen, die Einstellung der Moden zu verändern und sind auf Ergebnisse gekommen, die den anderen Modellen sehr ähnlich waren. Wir mussten dann noch ein bisschen Rücksicht auf die Strahlungsparametrisierung nehmen, damit wir innerhalb des Gültigkeitsbereichs blieben. Und haben dann Einstellungen gefunden, die erheblich bessere Ergebnisse hatten. Dazu kam dann noch, dass inzwischen in HAM ein anderes Zeitintegrationschema eingebaut wurde, das nicht mehr so empfindlich auf diesen Zeitschritt [der Modellsimulation] reagierte. Damit hatten wir dann eine Version, die recht zufriedenstellende Ergebnisse brachte. [...] Dadurch sind wir jetzt an einem Punkt, dass wir sagen: So, den Pinatubo können wir ganz gut simulieren, auch die Strahlungswechselwirkungen. Das sieht gut aus“ (Interview 25, 2008).

Nachdem das Modell für die Reproduktion des Pinatubo Ausbruchs gut funktionierte, kann es nun für die Simulation weiterer Vulkanausbrüche verwendet werden. Im Kontext der Forschung ist die Integration von Vulkaneruptionen noch weitgehend Neuland. „Es gibt verschiedene Gruppen, die versucht haben, den Einfluss des Sulfats zu berechnen. Aber so wie wir das jetzt machen, dass wir die Asche und das Sulfat haben und zudem richtig mit einer Aerosolmikrophysik rechnen, das hat eben noch keiner gemacht. Deswegen hatten wir auch so viele Probleme und mussten sehen, was alles passiert“ (Interview 25, 2008). Das eigentliche Ziel ist es, Supervulkanausbrüche zu simulieren, die um den Faktor 100 stärker sind als der Ausbruch des Pinatubo. Erhöhte Messwerte im Yellowstone Park, in dem ein Supervulkan vermutet wird, lassen die

Vulkanforscher weltweit aufmerken, und es stellt sich die Frage: Was wäre wenn?

„Dafür hat man Modelle. Das sind diese schönen Spielchen, die man eben nur mit Modellen machen kann. Und insofern ist das eigentliche Ziel, so eine Megaeruption zu berechnen. Und dann zu sehen, was für Auswirkungen hat das? [...] Deshalb möchten wir gleich mal gerne einen richtigen Supervulkan rechnen. ‚Mach das doch mal vor den Ferien.‘ Und, wie das so ist: Es geht nicht! Dieses mal ist es ECHAM, das wissen wir schon. Irgendetwas in der Konvektion streikt und es ist ein richtiger Modellcrash. Das Modell steigt richtig aus“ (Interview 25, 2008). Das Problem liegt in der Wechselwirkung mit der Strahlung, die einer großen Detailtiefe in der Modellierung bedarf. „Ich habe vor einem Jahr schon einmal eine Supervulkaneruption berechnet. Und damals ging das. Da hatte ich noch keine Wechselwirkung mit der Strahlung. D.h. in der Gegend wo diese dunkle Wolke aus Vulkanasche und Sulfat war, heizt sich jetzt alles auf. Und die Prozesse, die das auslöst, waren vor einem Jahr lange nicht so im Detail da, wie jetzt. Entsprechend bin ich damals ohne Probleme [Crash] durchgekommen, außer dass ich bereits gesehen hatte, dass die ganze Masse, die oben reingegeben wurde zu schnell wieder weg war. Im ersten Monat nach der Eruption wurde es eiskalt in Nordamerika und im nächsten Monat war die Temperatur schon fast wieder normal. Da war schon klar, da stimmt was nicht“ (Interview 25, 2008).

Das Beispiel macht deutlich, wie Modellierung im Forschungsalltag vorgeht und welcher Eigenlogik die komplexen in-silico Experimentalsysteme unterliegen. Dass jedoch eine solche Form der computerbasierten Forschung überhaupt möglich ist, liegt nicht zuletzt an der zunehmenden Standardisierung der Modelle und Daten in der Meteorologie. Denn vor allem der Modellvergleich ist eine wichtige Basis der Evaluation der Modelle und ihrer Ergebnisse. Die Klimaforschung kann wie kaum eine andere Wissenschaft auf eine Geschichte der Professionalisierung verweisen, welche sich in der weltweiten Synchronisierung und Standardisierung der Modellentwicklung zeigt. Motor dieser Professionalisierung ist die soziopolitische Frage: Was wäre wenn?

3 PROFESSIONALISIERUNG DER MODELLIERUNG

Rückblickend auf die letzten zwanzig Jahre lässt sich in der Klimamodellierung eine interessante Beobachtung machen. Aufgrund des enormen sozio-politischen Drucks, möglichst treffende Prognosen zukünftiger Klimaentwicklungen zu geben, und dem Umstand, dass diese Prognosen nur auf Basis der Computermodelle zu erstellen sind, findet seit gut zwei Jahrzehnten eine zunehmende Professionalisierung der Modellierung statt. Diese Professionalisierung zeigt sich an der internationalen Koordinierung und Synchronisierung der Modellierung, an der Ausdifferenzierung von Sub-Communities und an neuen Evaluationsstrategien. Vor allem die Synchronisierung ist einzigartig in der Wissenschaft und wird seit 1990 maßgeblich durch die Assessment Reports des IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change vorangetrieben. Die Synchronisierung der IPCC Referenzmodelle umfasst dabei die Verbesserung, Evaluierung und Standardisierung der Modelle in einem international konzertierten Rhythmus. Vor allem die Möglichkeit, Modelle miteinander vergleichen zu können, basiert auf dieser Synchronisierungsleistung. Daher entwickelt sich die Klimamodellierung zur paradigmatischen Simulationswissenschaft, die neue Standards der Modellierung, des Experimentierens mit diesen Modellen und der Evaluation generiert, welche auch für andere Wissenschaftsbereiche handlungsleitend werden könnten. Ähnlich der Astronomie im 17. Jahrhundert, die im Kontext der neuzeitlichen Form der Erkenntnisproduktion auf Basis wissenschaftlicher Instrumente und mathematischer Methoden eine Leitfunktion innehatte, übernimmt die Klimaforschung eine ähnliche Leitfunktion für die Computational Sciences. Dabei durchläuft sie Restrukturierungsprozesse, die sie zu einer paradigmatischen E-Science machen.

Standardisierung

Voraussetzung für die Standardisierung der Modellierung ist die Etablierung einer internationalen Infrastruktur für den Austausch zwischen den einzelnen Forschergruppen und Institutionen. Die Meteorologie kann hier auf eine lange Tradition gemeinsamer Forschung und Messung zurückblicken. Bereits 1873 wurde die IMO International Meteorological Organisation gegründet und 1882/1883 bildete das 1. Internationale Polarjahr den Auftakt zu international koordinierten Messungen und Forschungen.¹ Heute vertritt die Nachfolgeorganisation WMO World Meteorological Organisation der UN United Nations 188 Nationen und führt mit dem WCP World Climate Programme seit 1980 zahlreiche Aktivitäten der internationalen Koordinierung der Klimaforschung durch (vgl. WMO 2009, WCP 2009). Dazu gehören seit 1979 das WCIRP World Climate Impact Assessment and Response Strategies Programme, seit 1980 das WCRP World Climate Research Programme, seit 1989 das IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change und seit 1992 das GCOS Global Climate Observing System (vgl. WCRP 2009, IPCC 2009, GCOS 2009). Vor allem das WCRP Programm ist für die Standardisierung der Modellierung interessant, denn seine Mission ist es „to develop and evaluate climate system models for understanding, assessing and predicting Earth climate change and variations“ (WCRP 2009: Activities). Im Rahmen dieses Programms wurden 1980 die Working Group on Numerical Experimentation und 1997 die Working Group on Coupled Modelling gegründet. Dies sind nur einige Beispiele der international hochgradig vernetzten Meteorologie. Ein weiteres Beispiel auf EU Ebene ist das PRISM Programme for Integrated Earth System Modelling des ENES European Network for Earth System Modelling (vgl. PRISM 2009, ENES 2009), denn seit Anfang 2000 ist die Integration der bislang heterogenen Modelle und Modellkomponenten zu Erdsystemen das maßgebliche Ziel. So ist es Aufgabe von ENES „to develop an advanced software and hardware environment in Europe, under which the most advanced high resolution climate models can be developed, improved, and integrated“ (ENES 2009: Welcome). Voraussetzung für diese Integration ist die Standardisierung der Modellkopplungen und Softwareeinbettungen. Ein an diesen Prozessen beteiligter Klimaforscher formulierte die Situation 2005 folgendermaßen:

1 Gefolgt vom 2. Internationalen Polarjahr 1932/33, vom Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 und vom 3. Internationalen Polarjahr 2007/2008

„Die Idee ist, eine höhere Modularität zu erzielen, wenn man Standardkoppler für die Kommunikation der Modellteile benutzt. Dann kann man einen Modellteil durch einen anderen austauschen, der auch diesen Standard befolgt. Es gibt jetzt eine Reihe von Institute in Europa, die diese Koppler benutzen und damit ihre eigenen Komponenten mit anderen Komponenten koppeln. Also es gibt Institute, die benutzen unser Atmosphärenmodell, aber ein anderes Ozeanmodell oder umgekehrt. [...] Man kann mehrere Realisationen aus einem Pool von Modellen zusammenstellen und, vorausgesetzt es funktioniert auch wissenschaftlich gut, hat man die Möglichkeit, verschiedene Simulationen durchzuführen. Man bekommt eine größere Vielfalt und kann dann sehen: Ja, es kommt annäherungsweise die gleiche Antwort heraus, auch wenn ich technisch ein anderes System benutze. Oder es kommt etwas ganz anderes heraus“ (Interview 6, 2005).

Mittlerweile gehören gekoppelte Modelle zum Standard der Klimaforschung. In welche Richtung die aktuelle Entwicklung führt, dokumentiert das britische Projekt GENIE Grid Enabled Integrated Earth System Model:

„Our objectives are to build a model of the complete Earth system which is capable of numerous long-term (multi-millennial) simulations, using components which are traceable to state-of-the-art models, are scalable (so that high resolution versions can be compared with the best available, and there is no barrier to progressive increases in spatial resolution as computer power permits), and modular (so that existing models can be replaced by alternatives in future). Data archiving, sharing and visualisation will be integral to the system. The model will be used to quantitatively test hypotheses for the causes of past climate change and to explore the future long-term response of the Earth system to human activities“ (GENIE 2009: Scientific Research Challenge).

„The system will be accessed via a portal, which will allow a user to compose, execute and analyse the results from an Earth system simulation. After authenticating themselves with the portal, a user will have access to a library of components of the Earth system (for example, ocean, atmosphere) at different resolutions. The user constructs a composite application by selecting from these components; a selection informed by meta-data provided by a component's author and made available in the library. Together with these components the user selects appropriate mesh conversion tools, to enable data exchange at model boundaries, and defines an event-queue, which specifies the timing of the data exchanges and indicates what simulated data is to be archived for later inspection. The user also provides the data necessary to initialise the model. From this, an intelligent meta-scheduler determines the resource requirements and maps the processing required to a distributed Grid of compute resources using middleware such as Globus and Condor. At runtime each component produces distributed data, which can be monitored during execu-

tion and is also archived automatically as specified by the user. From the portal it is possible to browse this archive of results using post-processing visualization tools and reuse results from the archive to seed new calculations“ (GENIE 2009: Vision).

Die Komponenten für das Erdsystem liegen bereits vor. Woran gearbeitet wird, sind kompatible und effiziente Grid-fähige Koppler. Die Idee des Grid Computing ist es, auf einer internetbasierten Oberfläche Zugang zu Supercomputern, Simulationen und Messinstrumenten zu geben. In diesem Zusammenhang ist vom ‚virtual lab‘ und vom ‚web-portal based experiment management‘ die Rede. Ohne dass der Forscher sein Büro verlassen muss, kann er umfangreiche Experimentalsysteme je nach Fragestellung zusammenstellen und damit Experimente durchführen, da er auf Hard- und Software-Ressourcen weltweit Zugriff hat. Voraussetzung dafür sind nicht nur die als kompatible Module standardisierten Modelle und Koppler, sondern auch entsprechend vereinheitlichte Datenformate wie netCDF oder HDF5. netCDF Network Common Data Form ist das gängige Format wissenschaftlicher Daten und ein Standard-Interface für den Datenaustausch. HDF5 Hierarchical Data Format ist ein weitverbreitetes Satelliten-Datenformat. Ein weiteres, von der WMO standardisiertes Format ist GRIB Gridded Binary, das für meteorologische Reanalyse- und Vorhersagedaten verwendet wird. „In these [GRIB] codes the data are described in the message itself: it is the self-description feature. There will be sections at the beginning of the report, which define what data are transmitted in this message. These sections will in fact contain pointers towards elements in predefined and internationally agreed tables (stored in the official WMO Manual on Codes). Once these sections are read, the following part of the message containing the data (the Data Section) can be understood“ (WMO 2003: 2). Darüberhinaus gibt es Anstrengungen, die Metadaten wie Variablenamen, Koordinatensysteme oder Einheiten zu standardisieren.²

-
- 2 “The netCDF library is designed to read and write data that has been structured according to well-defined rules and is easily ported across various computer platforms. The netCDF interface enables but does not require the creation of self-describing datasets. The purpose of the CF conventions is to require conforming datasets to contain sufficient metadata that they are self-describing in the sense that each variable in the file has an associated description of what it represents, including physical units if appropriate, and that each value can be located in space (relative to earth-based coordinates) and time. An important benefit of a convention is that it enables software tools to display data and perform operations on specified subsets of the data with minimal user intervention. [...] This standard is intended for use with climate and forecast data, for atmosphere, surface and ocean,

Doch Computereperimente setzen eine weitere Standardisierung voraus, nämlich die der Verteilung der Messdaten. Bis heute liefert das verzweigte Netz aus Bodenstationen (ca. 260.000 Messdaten), Radio-sondierungen bzw. Wetterballons (ca. 600 Messdaten) und Satelliten (ca. 250.000 Messdaten) keine ausreichende globale Abdeckung. Die Stationen sind unregelmäßig verteilt und die Messdaten fehlerhaft. Da Simulationen in einer gleichmäßigen Gitterstruktur gerechnet werden – typischerweise in einem rechtwinkligen Euklidischen Gitter und seit Neuestem in einem Ikosaeder Gitter – müssen die Messdaten assimiliert, d.h. durch Interpolation in gleichmäßig verteilte Datenstrukturen überführt werden. Dies ist keine triviale Aufgabe, wie die Beschreibung des DWD Deutschen Wetterdienstes illustriert:

„Die Grundaufgabe der vierdimensionalen (3 Raum plus 1 Zeitdimension) Datenassimilation lautet somit: Aus unvollständigen und fehlerhaften Beobachtungen zusammen mit einer näherungsweisen Beschreibung der Atmosphäre durch die prognostischen Gleichungen des Vorhersagemodells soll der wahrscheinliche augenblickliche Zustand der Atmosphäre analysiert sowie der Fehler dieser Analyse bestimmt werden. Die ‚operationell‘, also routinemäßig täglich angewandten Verfahren der vierdimensionalen Datenassimilation [...] beruhen auf zahlreichen Vereinfachungen, wie etwa Linearisierung einiger wichtiger Operationen und ad-hoc Spezifikation der erforderlichen Beschreibung (mathematisch gefasst in ‚Kovarianzmatrizen‘) der statistischen Fehler der verschiedenen Eingangsinformationen“ (DWD 2009: Datenassimilation).

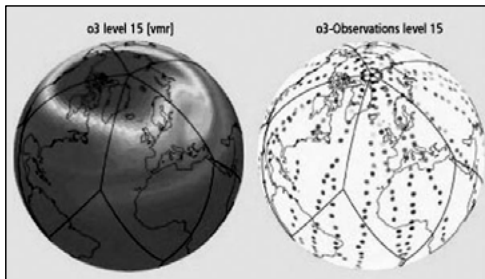


Abbildung 19: Datenassimilation (l.) und ENVISAT Messdatenverteilung (r.) (DEKLIM 2009)³

and was designed with model-generated data particularly in mind” (CF Metadata Convention 2009: 1).

- 3 „Ozonwerte aus rund 33 km Höhe, von einem Messinstrument des ENVISAT-Satelliten gewonnen, wurden mit Hilfe des neuen Verfahrens bearbeitet [SACADA Synoptic Analysis of Chemical Constituents by Advanced Satellite Data Assimilation]. Die rechte Graphik zeigt [das] Ergeb-

Primärdaten gibt es heute kaum noch. Messdatensätze werden mit Hilfe von Algorithmen automatisch in standardisierter Form aufbereitet und dafür nutzt man verschiedene mathematische Verfahren, aber auch Modelldaten. Noch deutlicher zeigt sich dies an den Satellitenbeobachtungen. Auch Satelliten liefern keine regelmäßig verteilten Messdaten und müssen entsprechend assimiliert werden. Wie umfangreich Datenassimilationen die Lücken ausgleichen, zeigt die Assimilation der ENVISAT Daten zur Ozonmessung, wie in Abbildung 19 dargestellt. Darüber hinaus sind Satellitendaten indirekte Daten, die erst durch Datenretrievals gewonnen werden. „Die Datensignale der Satelliten müssen umgedeutet werden,“ wie ein Klimamodellierer, spezialisiert auf Satellitendaten, erklärte. „Umdeuten heißt, interpretieren auf Basis von Modellen. Satelliten messen beispielsweise die Helligkeit im Blaubereich. Um daraus Informationen abzuleiten, müssen Annahmen über die Bewölkung getroffen werden, über die Dichte, Teilchengröße etc. Diese Unterscheidungen kann die Momentaufnahme nicht liefern. Man muss adäquate Annahmen [basierend auf Modellerkenntnissen] treffen. Praktisch sieht es so aus, dass es bessere oder schlechtere Datenretrievals gibt“ (Interview 9, 2005). Dennoch werden Satellitendaten als „Messdaten eingestuft, aber das sind sie eben nicht nur“ (Interview 9, 2005). Solche Datenretrievals werden automatisch auf Basis von Auswertungsalgorithmen durchgeführt.

Ein weiterer, wichtiger Bereich der Standardisierung sind Referenzdatensätze. Referenzdatensätze werden weltweit benutzt, um Modelle zu testen und zu evaluieren. Die Standardisierung liegt hier in der Auswahl bestimmter Daten und deren Aufbereitung für die gesamte Scientific Community. Zu diesen Referenzdatensätzen zählen auch Reanalysen historischer Daten. Historische Daten sind für die Evaluierung von Klimamodellen wichtig. Reproduzieren Modelle, initialisiert auf Basis historischer Messdaten, das aktuelle Klima, dann wird davon ausgegangen, dass sie auch zukünftige Entwicklungen prognostizieren können. Historische Messdaten liegen jedoch in einer sehr heterogenen Verteilung vor. Natürliche Datenarchive wie Eisbohrkerne, Baumstämme und Sedimente liefern nur lokale Informationen. Atmosphärendaten wurden bis in die 1940er Jahre in der Regel vom Boden her und Ozeandaten überhaupt nicht erhoben. Seit einiger Zeit werden daher historische Messdaten mit Assimilations-Techniken rekonstruiert bzw. neu berechnet, um räumlich

nis einer zehntägigen, fortschreitenden Assimilation“ (DEKLIM 2006: SACADA). Ozonmessungen mit Hilfe von Fernerkundung sind relativ genau, indem sie das reflektierte UV-Licht messen und damit auf die Ozonwerte rückschließen.

wie zeitlich gleichmäßig verteilte Datensätze zu erhalten. Ein Beispiel sind die NCEP/NCAR Reanalysedaten des US-amerikanischen NCEP National Centers for Environmental Prediction und des NCAR National Centre for Atmospheric Science. Mit diesen Daten werden verschiedene, rekonstruierte Messdatensätze der meteorologischen Variablen für den Zeitraum von 1948 bis 2002 im netCDF Format zur Verfügung gestellt (vgl. NCEP/NCAR 2009: Reanalysis). Mit diesem Referenzdatensatz werden Modelle weltweit evaluiert und für Prognosen initialisiert.⁴ Ein weiterer Reanalysedatensatz ist die ECMWF 40 Year Reanalysis (ERA-40) des ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. „The re-analysis project ERA-40 will cover the period from mid-1957 to mid-2002, overlapping the earlier ECMWF re-analysis, ERA-15, 1979 to 1993. [...] The data sets are based on quantities analysed or computed within the ERA-40 data assimilation scheme or from forecasts based on these analyses“ (ERA-40 2009). Referenzdatensätze liegen in der Regel im netCDF Format vor und können von internetbasierten Plattformen heruntergeladen werden. Eine Alternative dazu ist die Zusammenstellung eines individuellen Datensatzes aus einer Datenbank, die via Internet zugänglich ist. So bietet etwa das WDC World Data Center for Paleoclimatology mit der Ice Core Data Search einen solchen Service für Paleodaten an (vgl. NCDC/NOAA 2009: Ice Core Data Search). Insgesamt gibt es 52 dieser World Data Center.⁵

-
- 4 „The NCEP/NCAR Reanalysis 1 project is using a state-of-the-art analysis/forecast system to perform data assimilation using past data from 1948 to the present. A large subset of this data is available from PSD in its original 4 times daily format and as daily averages. However, the data from 1948-1957 is a little different, in the regular (non-Gaussian) gridded data. That data was done at 8 times daily in the model, because the inputs available in that era were available at 3Z, 9Z, 15Z, and 21Z, whereas the 4x daily data has been available at 0Z, 6Z, 12Z, and 18Z. These latter times were forecasted and the combined result for this early era is 8x daily. The local ingestion process took only the 0Z, 6Z, 12Z, and 18Z forecasted values, and thus only those were used to make the daily time series and monthly means here“ (NCEP/NCAR 2009: Reanalysis 1, Summary).
 - 5 “The World Data Center (WDC) system was created to archive and distribute data collected from the observational programs of the 1957-1958 International Geophysical Year. Originally established in the United States, Europe, Russia, and Japan, the WDC system has since expanded to other countries and to new scientific disciplines. The WDC system now includes 52 Centers in 12 countries. Its holdings include a wide range of solar, geophysical, environmental, and human dimensions data. These data cover timescales ranging from seconds to millennia and they provide baseline information for research in many ICSU [International Council for Science] disciplines, especially for monitoring changes in the geosphere and

Synchronisierung

Neben den zahlreichen Aktivitäten der Standardisierung von Daten, Modellen und Experimentalvoraussetzungen spielt die Synchronisierung der Klimamodellierung eine herausragende Rolle. Die seit 1990 publizierten IPCC Berichte – FAR First Assessment Report 1990, SAR Second Assessment Report 1995, TAR Third Assessment Report 2001, AR4 Fourth Assessment Report 2007 – führten zu einer Umstrukturierung der Klimaforschung, die einzigartig in der Wissenschaftslandschaft ist. Die sich beteiligenden Institutionen waren aufgrund des Publikationsrhythmus gezwungen, ihre Entwicklungsarbeit an den Modellen zeitlich anzupassen. Dies bedeutet, dass bereits während der Publikation eines IPCC Reports über Modellverbesserungen für den nächsten Report beraten wird. Institute, die IPCC Szenarien berechnen, durchlaufen dann einen international konzertierten Zyklus der Modellverbesserung, der Modellevaluation und schließlich der Szenarienberechnung und -auswertung von fünf bis sechs Jahren. Mit dieser Synchronisation werden die Vergleichbarkeit der Modelle, Simulationsbedingungen und Ergebnisse sowie die Güte der Forschung sichergestellt. Dieser Turnus ist bereits weltweit viermal durchlaufen worden und hat nun für den fünften Bericht, der 2014 publiziert werden soll, begonnen. Auf einer Expertentagung im Juli 2009 wurden die Ziele für den nächsten Bericht besprochen. Für die Klimamodellierung, die in WGI Working Group I organisiert ist, bedeutet dies: „The WGI assessment will address the full range of time scales (from decades to millennia) and space scales (from global to regional). This requires the consideration of the couplings between physical and biogeochemical processes and their influence on the sensitivity of the climate system, as well as the assessment of irreversible changes on the range of spatial scales in various components of the climate system. [...] Efforts targeted in these directions are already underway or planned within the climate modelling community (e.g. CMIP5 of WCRP)“ (IPCC 2009; 9, 10).⁶

biosphere - gradual or sudden, foreseen or unexpected, natural or man-made” (WDC 2009: About WDC).

- 6 „The IPCC Working Group I (WG I) assesses the physical scientific aspects of the climate system and climate change. The main topics assessed by WG I include: changes in greenhouse gases and aerosols in the atmosphere; observed changes in air, land and ocean temperatures, rainfall, glaciers and ice sheets, oceans and sea level; historical and paleoclimatic perspective on climate change; biogeochemistry, carbon cycle, gases and aerosols; satellite data and other data; climate models; climate projections, causes and attribution of climate change” (IPCC 2009: Working Groups/ Task Force).

Die Anforderungen an die Modellverbesserungen für AR5 sind aufgrund neuer Möglichkeiten wie Grid-Computing umfangreich. Bereits für AR4 waren die Modelle entscheidend verändert worden, denn es wurde erstmals mit gekoppelten Atmosphären-Ozeanmodellen gerechnet. Viele der Modelle waren zudem für Parallelrechner neu codiert und gleichzeitig umfangreich verbessert worden. Im vierten Bericht hieß es dazu: „Model improvements can, however, be grouped into three categories. First, the dynamical cores (advection, etc.) have been improved, and the horizontal and vertical resolutions of many models have been increased. Second, more processes have been incorporated into the models, in particular in the modelling of aerosols, and of land surface and sea ice processes. Third, the parametrizations of physical processes have been improved. [...] These various improvements, developed across the broader modelling community, are well represented in the climate models used in this report“ (IPCC AR4 WG1 2007: 596). Auf Basis der verbesserten Modelle, zu welchen auch das Atmosphärenmodell ECHAM5 gekoppelt mit dem MPI-OM Ozeanmodell gehörte, wurden ab 2005 verschiedene Szenarien berechnet. Beispielsweise simulierte das Max-Planck-Institut für Meteorologie mit seinem gekoppelten ECHAM5/MPI-OM Modell insgesamt achtzehn Szenarien. Dafür wurden allein im Jahr 2005 400.000 Rechnerstunden benötigt (vgl. Böttinger 2005).

Generell handelt es sich bei den IPCC Berichten um eine außergewöhnliche Form der Publikation. An den vierzehn Kapiteln des dritten Berichts, der Ende 2001 veröffentlicht wurde, arbeiteten ab Mitte 1998 122 verantwortlichen Autoren und 515 Co-Autoren. „One and a half year later, in January 2001, when the final versions of the chapters were accepted at the IPCC WGI plenary session in Shanghai, four revisions had been made of drafts of the chapters. The review rounds involved 420 experts and 100 governments. At the plenary session in Shanghai, the Summary for Policymaker (SPM) of the report was approved line by line by the governments in four days“ (Petersen 2006: 148). Jeder Kommentar im Rahmen des öffentlichen Schreibprozesses musste von den führenden Autoren berücksichtigt und geprüft werden. Einer der führenden Autoren des vierten Berichts erzählte im Gespräch, dass er über ein Jahr lang ausschließlich mit dem Schreiben und Korrigieren seines Kapitels beschäftigt war und auf hunderte Kommentare eingehen musste. Der Hintergrund für diesen Aufwand liegt in dem Wunsch, den Entstehungsprozess so offen und transparent wie möglich zu gestalten. Nahezu die gesamte Scientific Community der Klimaforschung ist in der einen oder anderen Weise an den Berichten beteiligt. Daher repräsentieren die IPCC Berichte den aktuellen Stand der Klimaforschung und die-

nen auch den Forschern selbst als Informationsquelle zu benachbarten Wissenschaftsgebieten.

Doch der Aufwand der IPCC Berichte hat einen weiteren Grund. Der soziopolitische Einfluss ist unübersehbar und die Berichte sind nicht unumstritten (vgl. beispielsweise Shackley et al. 1999; Skodvin 2000; Miller, Edwards 2001; Voss 2008). Ausgangspunkte der Kritik sind die enge Verbindung von Wissenschaft und Politik und die Unsicherheit der Prognosen. Während die beiden ersten Berichte relativ konkrete Angaben in Form von ‚best guess‘ Aussagen für ein ‚business-as-usual‘ Szenario machten – beispielsweise eine globale Erwärmung bis 2100 von 3°C (FAR) respektive 2°C (SAR) und eine Erhöhung der Meeresspiegel um 65 cm (FAR) respektive 15-95 cm (SAR) – formulierte man im dritten und vierten Bericht vorsichtiger.⁷ Zum einen wurden unterschiedliche sozioökonomische Szenarien als Ausgangsbasis der Projektionen entwickelt, zum anderen versuchte man, die Ergebnisse in Form von Wahrscheinlichkeitsaussagen zu relativieren. Bereits 1992 hatte man erstmals sechs Emissionsszenarien entwickelt, die für die Berechnung von Zukunftsprojektionen genutzt wurden (vgl. Leggett et al. 1992). Zwischen 1996 und 2000 wurden neue Szenarien entwickelt, welche den Projektionen des dritten und vierten Berichts zugrunde liegen und im SRES Special Report on Emission Scenarios veröffentlicht wurden (vgl. SRES 2000). In diesem Bericht sind vier Storylines (A1, A2, B1, B2) denkbarer sozioökonomischer Zukunftsentwicklungen auf Basis von Annahmen zum Bevölkerungszuwachs, zu technologischen und ökonomischen Entwicklungen, zum Energieverbrauch und der Landnutzung formuliert. Anhand dieser Szenarien berechnete man für insgesamt vierzig Szenarien die zu erwartenden Freisetzen von Treibhausgasen, um damit Vorhersagen zum Klimawandel zu ermöglichen, unter dem Motto: Was wäre wenn? Die Antworten finden sich in den beiden Berichten von 2001 und 2007. So wird im vierten Bericht für das moderateste der Szenarien (B1) eine globale Erwärmung bis 2099 von 1,1 bis 2,9°C und ein Anstieg des Meeresspiegels von 18 bis 38 cm prognostiziert. Für das

7 „In preparation of the TAR, a strong demand for a more systematic approach to uncertainties was identified and the subsequent discussions led to a so-called cross-cutting ‚Guidance Paper‘ on uncertainties (Moss and Schneider 2000). In that guidance paper, Moss and Schneider proposed that authors should use a probabilistic scale that expresses Bayesian confidence estimates about claims in five categories: very low confidence (0-5%), low confidence (5-33%), medium confidence (33-67%), high confidence (67-95%) and very high confidence (95-100%). [...] In WG1, however, the scale proposed by Moss and Schneider was changed into a likelihood scale which was not unequivocally defined by a Bayesian scale” (Petersen 2006: 160, 161).

dramatischste Szenario (A2FI) hingegen werden eine globale Erwärmung von 2,4 bis 6,4°C und ein Anstieg des Meeresspiegels von 26 bis 59 cm errechnet (vgl. IPCC AR4 WG1 Summary 2007: 13).⁸ Diese Projektionen werden im Kontext einer Wahrscheinlichkeitszuordnung als ‚likely‘ (66-90% Wahrscheinlichkeit) eingestuft.⁹

Die soziopolitische Bedeutung der IPCC Berichte sowie ihre Entstehung sind Thema sozial- und politikwissenschaftlicher Forschung. Ihre Bedeutung für die Modellierung und die Professionalisierung der Klimaforschung als Simulationswissenschaft ist bislang noch nicht im Detail untersucht worden. Doch bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass die Synchronisierung der Modellierung und des Experimentierens im Rahmen der IPCC Berechnungen ein wichtiges Instrument im Umgang mit in-silico Experimentalsystemen vorangetrieben hat: den Modellvergleich.

„Das ist ja das schöne am IPCC Prozess, es gibt da Modellvergleiche. D.h. die Läufe werden ausgewertet. Derzeit ist es so, dass jede [an den IPCC Szenarien beteiligte] Gruppe einen Standardlauf macht. D.h. unter den gleichen Bedingungen führen alle Gruppen die gleichen Experimente durch. Und das liefert man Lawrence Livermore. Mit ihren riesigen Rechnern und einem großen Stab an Mitarbeitern schaufeln die das alles durch und werten alle Modellergebnisse aus und zwar so, dass sie wirklich vergleichbar sind. Und daher weiß man auch nach jedem IPCC Prozess, wie steht man denn selbst da. Wie verhält man sich zu anderen Modellen? Wo ist man besser, wo ist man schlechter? Verglichen zu Beobachtungen natürlich. D.h. man sucht sich dann die Punkte heraus, wo man schwach ist und versucht sie zu verbessern. Sei es, dass man Parame-

8 „The B1 storyline and scenario family describes a convergent world with the same global population, that peaks in mid-century and declines thereafter, as in the A1 storyline, but with rapid change in economic structures toward a service and information economy, with reductions in material intensity and the introduction of clean and resource-efficient technologies. The emphasis is on global solutions to economic, social and environmental sustainability, including improved equity, but without additional climate initiatives. [...] The A2 storyline and scenario family describes a very heterogeneous world. The underlying theme is self reliance and preservation of local identities. Fertility patterns across regions converge very slowly, which results in continuously increasing population. Economic development is primarily regionally oriented and per capital economic growth and technological change more fragmented and slower than other storylines” (IPCC AR4 WG1 2007: 18).

9 „Virtually certain > 99% probability of occurrence; very likely > 90% probability; likely > 66% probability; about as likely as not 33 to 66% probability; unlikely < 33% probability; very unlikely < 10% probability; exceptionally unlikely < 1% probability” (vgl. IPCC 2005: 4).

trisierung, die Andere schon verwenden auch verwendet, weil man das Gefühl hat, das könnte die Ursache sein dafür, dass sie besser sind. Sei es, dass man sich nach Neuem umsieht. Sei es, dass man selbst etwas entwickelt“ (Interview 19, 2006).

Bereits 1978 hatte Jule Charney drei Atmosphärenmodelle miteinander verglichen (vgl. Phillips 2000a). Doch für Klimamodelle begann die Ära des Modellvergleichs erst in den 1990er Jahren mit den großangelegten Projekten des WCRP World Climate Research Programme: AMIP und CMIP. Ab 1990 wurden umfangreiche Studien zum Modellvergleich im AMIP Atmospheric Model Intercomparison Project organisiert, das 1995 in das CMIP Coupled Model Intercomparison Project überführt wurde (vgl. AMIP 2009, CMIP 2009). Beide Projekte stehen im direkten Zusammenhang mit den IPCC Referenzmodellen und Szenarienberechnungen. Doch Modellvergleiche leisten mehr: „Overall, the vigorous, ongoing intercomparison activities have increased communication among modelling groups, allowed rapid identification and correction of modelling errors and encouraged the creation of standardised benchmark calculations, as well as a more complete and systematic record of modelling progress“ (IPCC AR4 WG1 2007: 594). Eine Folge des verstärkten Austausches zwischen den Forschergruppen ist die Einrichtung von internetbasierten Plattformen, von welchen Modelle, Ergebnisse und Testberichte heruntergeladen werden können. Die M&D Modelle & Daten Gruppe in Hamburg administriert neben dem World Data Center for Climate eine solche Plattform für den Modell- und Datenaustausch.

„While the development and operation of numerical climate models is becoming more complex, the model development is distributed among an increasing number of institutes. It is not just the pure number of program code-lines and the challenges for software engineers that are growing by the increasing complexity of models, model environments and computer architecture, but also the number of computed results and aspects of analysis. [...] The considered workflows are

- * Integration of new model components, like e.g. atmospheric chemistry, land surface processes and inland-ice, into a coupled numerical model system (Earth System model),
- * Porting of Earth System models to different computer architectures,
- * Operating complex Earth System models for cost-effective computations via chain experiments,
- * Postprocessing, analysis and visualisation of the computation results, size of data sets amounting to several Terrabytes,

- * Documentation, application-oriented long-term data storage and validation of the computation results for own and external projects,
- * International distribution of Earth System research data and their integration into common information systems.

The workflows are processed exemplarily by M&D and abstracted. From this knowledge tool sets are developed, which will facilitate the day-to-day work of scientists. The development of tool sets was highly supported by the cooperative work in the EU-project PRISM. In the framework of this project several Earth System models from different institutes equipped with a variety of computer architectures were made available for testing purposes. The aim of the activities of M&D is to develop and promote best practice methods to handle Earth System models and their results“ (M&D 2009: About us, Mission).

Modelle, die früher nur in den jeweiligen Instituten oder im informellen Austausch kursierten, werden nun auf solchen Plattformen als Community Modelle öffentlich zugänglich koordiniert. Dies bedeutet, dass weitere Standardisierungen von Nöten sind, da neue Nutzergruppen die Modelle und Daten für ihre Forschung verwenden. Während es in den Experimentalwissenschaften üblich ist, akribische Dokumentationen der Experimente und Experimentalanordnungen zu geben, „[is] this same level of methodological detail [...] only rarely provided for in numerical simulation or modeling studies. This is true in spite of the fact that numerical experimental systems are inherently reproducible; unlike a physical experiment, which may be subject to many sources of uncontrollable variability, a valid numerical result can always be replicated exactly“ (Thornton et al. 2005: 431). Mit der CERA Datenbank des World Data Center for Climate wird versucht, diese Standardisierung voranzutreiben. „Model describing MD helps data users to understand how data have been generated. This becomes an important issue in projects where multi-model data are analyzed by scientists not knowing the numerical models in detail (e.g. CMIP projects, IPCC). For these users it may be sufficient to know which schemes have been used and perhaps the values of characteristic parameters. While this will not enable them to reproduce model output, it may put them into the position to understand differences in model results from different models“ (M&D 2009: IMID, Model Metadata).

Diese neuen Nutzer führen in der Forschung mit den in-silico Experimentalsystemen zur Ausdifferenzierung von Sub-Communities: Neben den Modellierern wächst die Anzahl der Modellnutzer und auch der Modelldatennutzer. Diese Sub-Communities sind zumeist institutionell voneinander unterschieden. Während die Modellierung von gekoppelten

Atmosphären-Ozean Modellen, wie sie mittlerweile Standard für IPCC Szenarien sind, in einer überschaubaren Anzahl von Instituten wie dem GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory in Princeton (GFDL-CM), dem Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg (ECHAM/MPI-OM), dem IPSL Institut Pierre Simon Laplace in Paris (IPSL-CM), dem BCC Beijing Climate Centre in Beijing (BCC-CM) oder dem Hadley Centre for Climate Prediction in Exeter (UKMO-HadCM) geschieht, finden sich die Modell- und Modelldatennutzer vor allem im universitären Bereich oder in Instituten, die im Rahmen der zunehmenden Interdisziplinarität der Erdsysteme für ihre Forschungen auf spezifische Modell- und Datenauswertungen der Klimaforscher angewiesen sind. Durch den aktuellen Trend zur Modellierung von Erdsystemen mit Biosphäre, Ökosphäre und Anthroposphäre ist ein weiterer Zuwachs der Nutzergruppen zu erwarten. Während Modellnutzer bestehende Modelle modifizieren und dann für ihre spezifischen Experimente verwenden, greifen Datennutzer auf die in-silico und in-situ Daten der Community zurück und analysieren diese auf spezifische Fragestellungen hin. Diese Spezialisierung kann als ein Indiz der Professionalisierung im Umgang mit den Modellen gewertet werden. Der Wissensaustausch geht dabei in beide Richtungen. Die Nutzer von Modellen geben in der Regel den Modellierern ein Feedback mit Hinweisen zu Problemen und Modellverbesserungen, die dann in die Programmierung der nächsten Modellversion einfließen. Ebenso nutzen die Modellierer Analysen der Datennutzer zu ihren in-silico Experimentaldaten, um ggf. die Modelle zu verbessern. Meist werden diese Austauschprozesse in Workshops organisiert.

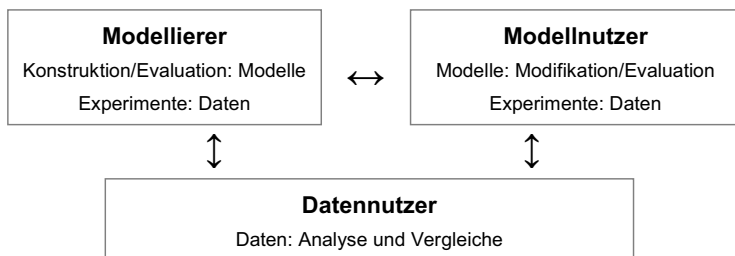


Abbildung 20: Sub-Communities der gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modelle und Erdsysteme (Gramelsberger 2009)

Modellkomplexität

Die Ausdifferenzierung in Sub-Communities und die Zunahme der Modell- und Datennutzer weist auf eine weitere Entwicklung hin: die zunehmende Modellfülle und Modellkomplexität. Zirkulationsmodelle sind nur eine Art von Modellen, die in der Klimaforschung Verwendung finden. EMICs Earth System Models of Intermediate Complexity, Boxmodelle, konzeptuelle Modelle und Prozessmodelle sind weitere gängige Modellarten. EMICs werden seit gut zehn Jahren entwickelt und sie werden vor allem dafür genutzt, die Interaktion zwischen verschiedenen Modellkomponenten zu untersuchen. Da sie vereinfachte Versionen der gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modelle sind und daher weniger Rechenkapazitäten benötigen, lassen sich mit ihnen wesentlich mehr Experimente und diese über längere Zeiträume durchführen. EMICs sind auch für Sensitivitätsstudien geeignet, um die Sensitivität des Modells auf Parameterjustierungen zu testen.

Die verschiedenen Modellarten werden oft in einer hierarchischen Einteilung von großen Modellen (Erdsysteme, Zirkulationsmodelle) zu kleinen Modellen (EMICs, konzeptuelle Modelle) gewertet (vgl. Henderson-Sellers, McGuffie 1987). Die Erfahrung der letzten Jahre bezüglich der Modellevaluierung zeigt jedoch, dass das gesamte Spektrum an Modellen notwendig ist, da sich die Modelle gegenseitig ergänzen und voneinander abhängig sind. So benötigen EMICs die getesteten Parametrisierungen der großen Modelle, während diese oft zu komplex sind, um detaillierte Studien zur Sensitivität der Modelle durchzuführen. Boxmodelle dienen, wie das Beispiel der Fehlersuche in der Vulkanparametrisierung zeigte, dem Test einzelner Modellkomponenten und konzeptuelle Modelle wiederum sind für die Veranschaulichung grundlegender Prozesse unabdingbar.

„Definition of climate in terms of the state and statistics of the climate system components is now commonly accepted, at least in the community of climate modelers. Because of the broad spectrum of typical time scales of the different components of the climate system, simulation of climate system dynamics requires different types of models. [...] Generally, we argue that there is a clear advantage in having available a spectrum of climate system models. Most EMICS are specifically designed for long-term simulations over many millennia, and some are designed to simulate the interaction of as many components of the climate system as possible in an efficient manner. Moreover, EMICs can explore the parameter space with some completeness. Thus, they are more suitable for assessing uncertainty, which CGCMs [coupled atmosphere and ocean general circulation models] can do to a significant lesser extent. On the other hand, it would not be sensible to apply EMICs to studies

which require high spatial resolution. EMICs can also be used to screen the phase space of climate or the history of climate to identify interesting time slices, thereby providing guidance for more detailed investigations to be undertaken by CGCMs. For the interpretation of model results, conceptual models appear to be very useful“ (Claussen et al. 2002: 584, 595).

Der Trend zur Modellierung von Erdsystemen zeigt, dass die Vielfalt der Modelle sowie ihre Kombinationsmöglichkeiten steigen. Die Vision einer ‚plug-and-play‘ Umgebung für in-silico Experimentalsysteme lässt jede Art von Modell zum integrierbaren Modul werden. Standardisierungen sowie die Entwicklungen im Software Engineering der Modelle – Kapselung, definierte Input/Output-Schnittstellen, etc. – unterstützen diese Tendenz. Doch neben der zunehmenden Fülle an Modellen steigt auch die Modellkomplexität rapide an.¹⁰ Während der dynamische Kern der Zirkulationsmodelle relativ alt ist und auf Vilhelm Bjerknes Konzept von 1904 zurückgeht, wächst die Anzahl der integrierten Prozesse in Form von Sub-Modellen und Parametrisierungen.

Parametrisierungen sind notwendig, da die Diskretisierung der dynamischen Grundgleichungen den meteorologischen Variablen nur einen Mittelwert je Volumenelement zuordnet, der subskalige Bewegungs- und Transportvorgänge nicht erfasst. Um diese subskaligen Prozesse in ihrer Wirkung auf die gemittelten Größen zu berücksichtigen, bedarf es expliziter Beschreibungen in Form von Parametrisierungen, wie das Beispiel des Schmelzvorgangs in stratiformen Wolken illustrierte. „Man löst dies Problem durch Hinzufügungen von Parametrisierungen, d.h. von Termen, die den Netto-Effekt der nichtaufgelösten Prozesse auf die durch Diskretisierung aufgelösten Prozesse darstellen. Diese Terme, oder Einflüsse von im wesentlichen Unbekanntem, werden als (deterministische) Funktionen der aufgelösten, mittleren Zustandsvariablen formuliert“ (von Storch, Güss, Heimann 1999: 109). Interessanter Weise gibt es weder in der Mathematik noch in der Meteorologie eine einheitliche Definition dessen, was unter dem Begriff des Parameters verstanden wird. „There are four possibilities to derive parameterizations: 1) derive an analytical expression of the process of interest from first principles. 2) Use results from laboratory studies and assume that the relationship amongst the variables is still valid in the real atmosphere. 3) Use data from field measurements: either long-term measurements or measurement campaigns. 4) Use detailed models which resolve the

10 Komplexität nimmt hier Bezug auf die Anzahl der integrierten Prozesse und nicht auf die mathematische Komplexität nicht-linearer Prozesse, wie sie in der Dynamik der Modelle Anwendung findet.

process of interest and derive a parameterization based on that“ (Lohmann et al. 2006: Submission).

Die Parametrisierungen in den Modellen wachsen enorm an und ermöglichen es, immer mehr Prozesse zu integrieren. So ‚schwimmen‘ in den simulierten Ozeanen mittlerweile Fische, denn auch sie haben Einfluss auf den Kohlendioxidhaushalt der Meere.¹¹ Doch Parametrisierungen gelten als problematisch, da sie nur selten auf physikalischen Grundprinzipien basieren (first principles). Meist beruhen sie auf funktionalen Zusammenhängen oder empirisch begründeten Annahmen, die aus Beobachtungen und Messkampagnen stammen. Die Problematik resultiert aus der Anpassung der empirisch gewonnenen Parametrisierungen an die großskaligen und gemittelten Modelle anhand von Messergebnissen, die sich auf Punktmessungen oder kleine Messareale beziehen und somit kleinräumige Effekte widerspiegeln. Parametrisierungen sind daher oft lokalen Beschränkungen unterworfen, während sie im Modell global gültig sind. Als Alternative zu diesen empirischen Parametrisierungen sind Prozessmodelle für kleinskalige Prozesse denkbar, beispielsweise hoch aufgelöste Wolkenmodelle, aus welchen dann Parametrisierungen gewonnen werden. Ein Großteil der Forschungs- wie der Modellierungsarbeit konzentriert sich daher auf die Integration adäquater Parametrisierungen in die Modelle. „Man benötigt viel Zeit, bis man neue Parametrisierungen modelliert und codiert hat. Diese werden erst im Einzelnen getestet und dann im Ensemble“ (Interview 19, 2006). Die

11 Ozeane nehmen CO₂ auf und speichern es. Daher ist es für die Klimafor-scher von Interesse, diese Speicherprozesse in das Modell zu integrieren. CO₂ wird von dem, an der Ozeanoberfläche schwimmenden Phytoplankton aufgenommen. Phytoplankton steht am Beginn der Nahrungskette und wird von Zooplankton und Fischen gefressen. Dadurch gelangt der Kohlenstoff relativ schnell wieder in den Ozean und die Atmosphäre zurück. Sinkt das Plankton hingegen zu Boden, wird Kohlenstoff langfristig gespeichert. Dieser Prozess lässt sich modellieren und in die Ozeanmodelle integrieren. Aktuell geschieht das in Form eines Plankton-Fisch-Kohlenstoff Parameters. Dieser Parameter ist, wie all die anderen Parameter eines Klimamodells, ein mathematischer Term der charakteristischen Plankton-Fisch-Kohlenstoff Veränderungsrate gemittelt auf den gesamten Ozean. Veränderungsraten basieren auf mathematischen Termen, welche die Abnahmen (Senken) und Zunahmen (Quellen) eines Prozesses angeben. Im Beispiel des Plankton-Fisch-Kohlenstoff Parameters nimmt der freigesetzte Kohlenstoff zu, wenn die Anzahl der Fische zunimmt, da dann mehr Plankton konsumiert wird und dadurch der im Plankton gespeicherte Kohlenstoff über die Fische freigesetzt wird. Dieser komplexe Prozess wird als global gemitteltes, relativ einfaches Verhältnis abstrahiert und als mathematischer Term in das Modell eingefügt. Auf diese Weise werden zahlreiche subskalige Prozesse in die Modelle integriert.

Problematik der Parametrisierungen liegt darüber hinaus in jenen Parametern, die sich nicht messen lassen. Sie müssen justiert werden, doch es gibt kaum Anhaltspunkte, wie die Justierungen geeicht werden können. Dies ist einer der Hauptkritikpunkte an Klimamodellen.

„The parametrizations also involve numerical parameters that must be specified as input. Some of these parameters can be measured, at least in principle, while others cannot. It is therefore common to adjust parameter values (possibly chosen from some prior distribution) in order to optimise model simulation of particular variables or to improve global heat balance. This process is often known as ‚tuning‘. It is justifiable to the extent that two conditions are met: 1. Observationally based constraints on parameter ranges are not exceeded. Note that in some cases this may not provide a tight constraint on parameter values (e.g., Heymsfield and Donner, 1990). 2. The number of degrees of freedom in the tuneable parameters is less than the number of degrees of freedom in the observational constraints used in model evaluation. This is believed to be true for most GCMs“ (IPCC AR4 WG1 2007: 596).

Da die Zirkulationsmodelle jedoch alle auf derselben Dynamik beruhen, unterscheiden sie sich in erster Linie in ihren Parametrisierungen. „Es ist eigentlich so, dass wir neue Parametrisierungen einführen, die über das hinausgehen, was andere haben und wir von daher neue Fragen stellen und beantworten. Und es hat jedes Institut so seine Spezialitäten. Aber im Großen und Ganzen wird schon viel von der Community vorgegeben“ (Interview 19, 2006).

Evaluierung

Computerexperimente benötigen auf Grund ihres rein semiotischen Status neue Evaluierungsstrategien. Im Unterschied zu Laborexperimenten können sie nicht auf das Korrektivum der materialen Widerständigkeit hoffen und insofern auch nicht scheitern.¹² Als Erkenntnisinstrumente, die in der Tradition von quantitativen Prognosen und Präzisionsmessungen stehen, werden mit Computerexperimenten Fluten von Daten generiert. Die klassische Version der Hypothesenprüfung an „empirisch möglichst leicht nachprüfbarer bzw. anwendbarer singulärer Folgerungen

12 Allenfalls ein Computercrash lässt vermuten, dass innerhalb des Modells etwas konfligiert, wie das Beispiel der Fehlersuche in der Vulkanparametrisierung verdeutlichte. Dies muss allerdings nicht automatisch bedeuten, dass die neu hinzugefügte, codierte Theorie falsch ist. Ein Computerabsturz kann auch auf bereits bestehende Fehler oder Unzulänglichkeit im Modell hinweisen, die zuvor nicht zu Tage getreten sind.

(„Prognosen“)⁴ (Popper 1935/1989: 8) entspricht der Ja/Nein-Logik physikalischer Experimente. Die Evaluierungsstrategien, die in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurden, tragen jedoch der Eigenart der Computerexperimente und ihren Datenfluten Rechnung. Einen guten Überblick über die Entwicklung liefert das achte Kapitel *Climate Models and Their Evaluation* des aktuellen IPCC Berichts (vgl. IPCC AR4 WG1 2007: 589-662). Dabei lassen sich zwei Arten von Evaluationsstrategien für die Resultate der Computerexperimente aufzeigen: die Evaluation an der Empirie (Messdaten) wie auch an Modellen. Zudem haben sich zwei unterschiedliche Perspektiven der Evaluation von in-silico Experimentalsystemen herausgebildet: die Evaluation auf Systemebene als auch auf Komponentenebene. „A climate model is a very complex system, with many components. The model must of course be tested at the system level, that is, by running the full model and comparing the results with observations. Such tests can reveal problems, but their source is often hidden by the model's complexity. For this reason, it is also important to test the model at the component level, that is, by isolating particular components and testing them independent of the complete model“ (IPCC AR4 WG1 2007: 594). Die Auflösung der Komponentenevaluierung reicht von Modellteilen und Modulen bis zu einzelnen Parametrisierungen.

Mathematische Tests zu numerischen Verfahren und Fallstudien zu Parametrisierungen werden in internationalen Messkampagnen, Projekten und Workshops organisiert. In solchen Workshops wird beispielsweise die Dynamik der teilnehmenden Modelle hinsichtlich ihrer Performance und Zuverlässigkeit unter standardisierten Vorgaben getestet und miteinander verglichen. Parametrisierungen werden in aufwendigen Kampagnen überprüft und verbessert. Das EUROCS European Cloud Systems Projekt beispielsweise untersuchte die Parametrisierung von Wolken in Klimamodellen. Ziel war es, durch Analyse von Mess- und Simulationsdaten die Wolkenschemata zu verbessern.

„Clouds probably remain the largest source of uncertainty affecting evaluations of climate change in response to anthropogenic change. That explains for a large part why the range of simulated temperature changes in response to a CO₂ doubling (1.5 to 4.5 C) is quite invariant for almost 20 years [...]. The recent interest to develop capability to predict regional climate changes stress the importance to better represent clouds in models. [...] The strategy used in EUROCS to address these issues is based on the use of a hierarchy of models and observations to integrate cloud studies across the full range of scales. Numerical models range from General Circulation Models (GCMs) through Single Column Models (SCMs) to Cloud Resolving Models (CRMs) and Large Eddy Simulations (LES). Observations which will be used will vary from

global satellite measurements to local observations of individual clouds through lidar and millimetric radars.“ (EUROCS 2003: Project Description).

Das Ziel der Evaluation einzelner Komponenten ist es, Benchmark Tests der Prozesse und Metriken zur Zuverlässigkeit der Resultate zu entwickeln.¹³ Doch um überhaupt Komponenten testen zu können, bedarf es zu allererst einer Evaluation des gesamten Modells auf Systemebene. Grundlegendster Test hierbei ist die Evaluation der Modellergebnisse im Vergleich zum aktuellen Klima. Dazu werden die Modelle mit historischen Daten gestartet, beispielsweise mit Klimadaten aus der Zeit vor der Industrialisierung oder noch früher. Repräsentieren die Ergebnisse das aktuelle Klima, dann wird davon ausgegangen, dass man das Modell auch für Zukunftsprojektionen nutzen kann. Die Evaluation eines Modells berücksichtigt auch bestimmte Muster, die im Wechsel der berechneten Jahreszeiten auftreten, wie die Konversion der Wetterlagen oder regelmäßig auftretende Wetterphänomene. Bildet ein Modell diese Muster nicht aus, ist es fehlerhaft. Eine weitere Möglichkeit der Evaluation bietet sich im Vergleich zwischen Klima- und Wettermodellen. Beide basieren auf derselben Dynamik und auf ähnlichen Prozessen. Doch Wettermodelle sind wesentlich höher aufgelöst, in der Regel auf einige Kilometer. Dadurch lassen sich bestimmte Prozesse zwischen beiden Modelltypen vergleichen und untersuchen.

Eine relative neue Art, Klimamodelle zu evaluieren sind Ensembleprognosen. Mit der steigenden Leistungsfähigkeit der Computer ist es möglich geworden, zunehmend umfangreichere aber auch zahlreichere Simulationsläufe zu berechnen. Da Klimamodelle komplexe Systeme sind, die sensitiv auf die gewählten Anfangsbedingungen reagieren, versucht man mit Ensemble-Prognosen den Grad der Sensitivität eines Modells zu bestimmen. Indem Hunderte von Modell-Läufen bei leicht variierenden Anfangsbedingungen durchgeführt werden, lässt sich erkennen, wie sensitiv sich das Modell verhält. Weichen die Resultate der einzelnen Modell-Läufe zu stark voneinander ab, da das Modell zu sensitiv reagiert, gilt es, die Prognosekraft des Modells kritisch zu hinterfragen. Doch Ensemble-Prognosen leisten noch mehr. Es wird davon ausgegangen, dass der aus den zahlreichen Läufen errechnete Mittelwert statis-

13 „A number of different observationally based metrics have been used to weight the reliability of contributing models when making probabilistic projections [...] The above studies show promise that quantitative metrics for the likelihood of model projections may be developed, but because the development of robust metrics is still at an early stage, the model evaluations presented in this chapter are based primarily on experience and physical reasoning, as has been the norm in the past” (IPCC AR4 WG1 2007: 594, 595).

tisch betrachtet eine höhere Prognosegüte hat als einzelne Experimente. Daher sind Projektionen basierend auf Ensembleprognosen zuverlässiger.

Ziel dieser Evaluationsbemühungen ist es, die Modelle wie auch Modellergebnisse verlässlicher zu machen. Wie die zu niedrigen Temperaturen in bestimmten Höhen basierend auf einer nicht adäquaten Wasserdampfverteilung im Modell (cold bias) zeigt, repräsentieren globale Klimamodelle regional nie exakt das aktuelle Klima. In der Summe gleichen sich diese Schwächen jedoch oft aus. Da Klima, dem Programm von Julius Hann folgend, der gemittelte Zustand der Atmosphäre basierend auf der Summe aller meteorologischen Phänomene ist (vgl. Hann 1908), ist die Regionalisierung in globalen Modellen eine Herausforderung für die Klimamodellierung. Da man sowohl für die Vorhersage zukünftiger Entwicklungen, als auch für Experimente mit dem Klima allein auf in-silico Experimentalsysteme angewiesen ist, lässt sich nachvollziehen, warum ein derartiger Aufwand für die Modellierung und Evaluierung betrieben wird. Dabei verändert sich sozusagen nebenbei die Forschungslandschaft als auch die Forschungspraxis und gestaltet die Meteorologie in eine paradigmatische e-Science um.

Reshaping Science

Die Umgestaltung der Meteorologie zur paradigmatischen e-Science mit ihrer Leitfunktion im Umgang mit in-silico Experimentalsystemen und Computerexperimenten, zeigt sich an den dargestellten Indikatoren: Der Standardisierung und Synchronisierung der in-silico basierten Forschungspraxis, der Ausdifferenzierung von Sub-Communities, der koordinierten und zunehmend standardisierten Modelldistribution innerhalb der Klima- und Erdsystemforschung, der Möglichkeit des Modellvergleichs, der Etablierung einer internationalen Infrastruktur der Modellevaluierung, der zunehmenden Standardisierung der Modelleinbettung für plug-and-play Erdsysteme und der, mit diesen Entwicklungen einhergehenden Professionalisierung der Modellierung. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass der Einfluss des Computers seit den 1950er Jahren zu einer Vereinheitlichung der Meteorologie führte. „As a result of the growth of science, the availability of computers, and the new style of research and practice, meteorology became a much more unified discipline“ (Nebeker 1995: 184). Wurde die Meteorologie bezüglich ihrer Messkampagnen im 20. Jahrhundert zur Großforschung, so ist sie es nun auch bezüglich ihrer in-silico Experimentalsysteme geworden. Aktuell werden die Vorhersagemodelle, wie die gekoppelten Atmo-

sphären-Ozean-Modelle oder die Erdsysteme, aus der Forschung herausgenommen und in einen operationellen Betrieb überführt.¹⁴ Die Administration dieser Modelle sowie ihre Zurverfügungstellung für immer mehr Nutzer, auch außerhalb der Meteorologie, erfordert diesen Schritt. Die Folge ist, dass sich die in-silico Experimentalsysteme in ihrem Status zunehmend zu Großforschungsinstrumenten ähnlich Satelliten wandeln, die Serviceleistungen erbringen – für die Wissenschaft oder, wie im Falle der Wettervorhersage und der Klimaprojektionen, für Industrie und Gesellschaft.

In Hinblick auf die Neuheit der Simulation als Instrument wissenschaftlicher Erkenntnisproduktion, lässt sich diese Entwicklung als zunehmende Etablierung der Simulation als gängiges Erkenntnisinstrument deuten. Dabei verändert sich jedoch nicht nur die Forschungspraxis erheblich, sondern auch die Logik und Epistemik der Forschung. „The large computer models, either for forecasting or for climate simulations, provided a way of tying together theoretical results. [...] Indeed, the research on the individual processes was often motivated by the desire to improve large models“ (Nebeker 1995: 184). Diese Entwicklung führt dazu, dass „a variety of physical processes could be synthesized mathematically within the computer“ (Charney 1972: 117). Als Synthesizer für Theorien verstanden, als synoptisches Theorieinstrument oder als Theoriebaukasten unterliegt der Computer einer anderen Logik, als der analytischen, auf einzelne Prozesse konzentrierten Erkenntnisinstrumente. Es geht um eine neue Art des Experimentierens mit Messdaten aufgeladenen Theorien. Doch wenn sich die Epistemik und Forschungslogik ändert, dann ändert sich auch das Bild der Welt, wenn sie aus dieser neuen Perspektive betrachtet wird. Der Vergleich mit der wissenschaftlichen Revolution in der Neuzeit scheint daher angebracht. Ebenso wie sich damals die Methoden und Blickweisen änderten und damit das, was als wissenschaftliche Erfahrung galt, vollzieht sich mit dem Computer eine ähnliche Veränderung. Analog zu den Transformationen des 17. Jahrhunderts verändert sich die Wissenschaft als Computational Science heute. „There is no one independently given class of practises that naturally correspond to the label „scientific experimentation“ [heute: scientific simulation]; there are many different practices, with their associated epistemological characterizations, that relate to experience and its place

14 Diese Entwicklung der Klimamodellierung hin zur Großforschungseinrichtung und zum operationellen Betrieb der Modelle lässt sich an den aktuellen Umstrukturierungen des NCAR National Center for Atmospheric Research in Boulder und dem dortigen CCM Climate Community Model erkennen.

in the creation of natural knowledge. In the seventeenth century [heute: twenty-first century] old practices changed and new ones appeared. Those changing practises represent shifts in the meaning of experience itself – shifts in what people saw [heute: see] when they looked at the events in the natural world“ (Dear 1995: 12, 13). Wie dieser „shift in the meaning of experience itself“ heute aussieht, wird im Rahmen der philosophischen Verortung der Computerexperimente zu klären sein.

III PHILOSOPHISCHE VERORTUNG

1 COMPUTEREXPERIMENTE

Der Einblick in die Klimamodellierung und ihren Umgang mit Computerexperimenten zeigt, dass sich die Meteorologie in den letzten zehn Jahren zu einer paradigmatischen e-Science entwickelt hat. Doch die Meteorologie steht damit nicht alleine da, auch wenn ihre besonderen Voraussetzungen diese Transformationen forciert haben. In nahezu allen naturwissenschaftlichen Disziplinen lassen sich ähnliche Entwicklungen ausmachen. Der Computer als Forschungs-, Erkenntnis- und Prognoseinstrument hat mittlerweile jeden Winkel der wissenschaftlichen Welt erreicht und hinterlässt seine Spuren. Damit hat die zweite Hälfte der wissenschaftlichen Revolution, von der James Glimm in der bereits zitierten Hommage an John von Neumann sprach, begonnen.¹ Für die wissenschaftsphilosophische Verortung der Computerexperimente ist es daher hilfreich, die allgemeinen Bedingungen ihrer Möglichkeit aus dem historischen Kontext sowie dem Fallbeispiel der Klimamodellierung zu rekonstruieren.

1 „John von Neumann foresaw that the equations describing scientific phenomena, once expressed in mathematical terms, could be solved numerically, without recourse to routine or repetitive experiment. This vision is nothing less than the second half of the scientific revolution. Throughout four centuries we have expected that a successful scientific theory would have its major concepts expressed quantitatively as numbers and its major relationships expressed as mathematical equations; the truth of this theory was settled by experimental tests and hand calculations, often in idealized situations. The second half of the scientific revolution is no less sweeping in its goals. The solutions of the equations are also to be obtained on mathematical grounds, by numerical computation, without restriction to idealized cases”(Glimm 1990: 185).

Allgemeine Bedingungen

Wie die historische Rekonstruktion zeigte, gründen Computerexperimente in der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts. Die maßgeblichen Leistungen dieser Revolution waren die Substitution lebensweltlicher Wahrnehmungen durch instrumentenbasierte Handlungen (Experimente) und Aufzeichnungen (Messungen) als auch die Quantifizierung und Mathematisierung dieser instrumentenvermittelten Erkenntnisse. Indem die theoretischen Begriffe nicht mehr substantiell, sondern operationell konzipiert wurden – Isaac Newton betrachtete physikalische Vorgänge als Wechselwirkungen von Raum, Zeit und Massepunkten (vgl. Newton 1687) – ließen sie sich als Maße, bezogen auf Raum und Zeit, definieren. Und indem Raum und Zeit nicht mehr als kontinuierliche Größen verstanden wurden, sondern als differenzierbar – und mit dem Differenzialkalkül ein geeignetes mathematisches Instrument zur Erfassung von Veränderung geschaffen worden war – schloss sich der Kreis zwischen Quantifizierung und Mathematisierung realweltlicher Phänomene.² Diese Entwicklungen schafften die Voraussetzung für die Neudefinition dessen, was unter wissenschaftlicher Erfahrung und unter Wahrheit, besser gesagt: Evidenz, zu verstehen war. Nicht mehr die allgemeine Einsichtigkeit der Phänomene, wie seit Aristoteles gefordert, war das entscheidende Evidenzkriterium, sondern ihre Quantifizierbarkeit und Berechenbarkeit. Damit war „die Basis dafür gelegt, wahr mit mathematisch zu identifizieren“ (Böhme 1977: 252) und die Legitimation wissenschaftlicher Fakten an mathematische Verfahren und Instrumente zu delegieren.³ Möglich wurde dies durch die Lockerung der an-

-
- 2 Dieser Kreis meint den Zusammenschluss der „concepts expressed quantitatively as numbers“ (Messung) mit den „major relationships expressed as mathematical equations“ (Gesetze) und begründet die Basis der strukturellen Isomorphie zwischen mathematischer Beschreibung und Welt (vgl. Glimm 1990).
 - 3 In ihrer Studie *Experimentelle Philosophie. Ursprünge autonomer Wissenschaftsentwicklung* rekonstruieren Gernot Böhme, Wolfgang van den Daele und Wolfgang Krohn diesen Übergang als einen Prozess der kognitiven Ausdifferenzierung eines neuen Subjekt-Objekt-Verhältnisses. Rekurrend auf Jean Piaget zeigen sie den Übergang zu einem konstruktivistischen Subjekt-Objekt-Verhältnis auf, dessen Prinzipien auf die Wissenschaft angewandt „Gesetzmäßigkeit der Erfahrung, Fortschrittsbewußtsein, konstruktives Modelldenken“ bedeuten (Böhme, van den Daele, Krohn 1977: 8; vgl. Piaget 1972, 1973). Eine der Folgen dieses neuen Verhältnisses ist die Relativierung der Erkenntnis: „Das Bewußtsein davon, daß die Erkenntnis des Menschen von den Bedingungen abhängt, unter denen er sie beginnt, erfährt die Präzisierung, daß der Mensch zwischen sich und die Natur Instrumente einfügt, von deren Sicherheit er überzeugt ist“ (Krohn 1977: 114).

tiken Exaktheitsforderung und durch das neue ‚Prinzip der Stetigkeit‘ (vgl. Klein 1895).

Indem die zunehmend zahlreicher werdenden, empirischen Einzeldaten unter Gesetze subsumierbar und Prognosen extrapolierbar wurden, transformierte sich die induktiv-deduktive Rekonstruktion der Phänomene in den hypothetisch-deduktiven Forschungsstil der Moderne. Dieser neue Forschungsstil setzte Experimentalforschung mit Präzisionsmessung gleich und koordinierte Experiment, Messung und Theorie in ein und demselben Darstellungsraum: einem durch Koordinaten metrisierten, rein symbolischen Raum der Mannigfaltigkeiten. Dadurch kehrte sich das Verhältnis von Theorie und Empirie um: Hypothesen waren nicht mehr zwingend an vortheoretische Beobachtungen gebunden, sondern konnten durch quantitative Prognosen der mathematisierten Theorien gewonnen und in der messenden Experimentalforschung bestätigt werden. Die Extrapolation avancierte zum maßgeblichen Forschungsinstrument der Moderne.⁴ Solange es sich dabei um „empirisch möglichst leicht nachprüfbare bzw. anwendbare singuläre Folgerungen (‚Prognosen‘)“ handelte, konnte deren Richtigkeit oder Falschheit in „den Experimenten usw., entschieden“ werden (Popper 1935/1989: 8). Doch anstelle eines experimentellen Gelingens oder Fehlschlagens trat nun zunehmend die exakte Messung: „Die Antwort, die das Experiment gibt, ist nicht mehr ein einfaches ‚ja‘ oder ‚nein‘, vielmehr ein gemessener Zahlenwert“ (Stichweh 1984: 233) beziehungsweise eine Flut an Messdaten. Doch wenn die experimentellen Antworten komplexer wurden, dann mussten auch die Fragen, in Form von deduzierten Folgerungen, komplexer werden. Damit gelangte die wissenschaftliche Revolution der Neuzeit in der Moderne an ihr vorläufiges Ende, denn die Mathematik konnte mit der Quantifizierung nicht mehr Schritt halten. Ende des 19. Jahrhunderts kehrt sich das produktive Verhältnis des hypothetisch-deduktiven Forschungsstils in ein trial-and-error Verfahren auf Basis empirischer Formeln und eines experimentellen Rechnens um, als: „to replace a computation from an unquestioned theory by direct measurement“ (Goldstine, von Neumann 1946: 4).

Dieser Schnelldurchlauf durch gut dreihundert Jahre Wissenschaftsentwicklung legt die Bedingungen der Ermöglichung von Computereperimenten offen. Die Wissenschaft bedurfte zwingend der Automatisierung der Extrapolation, um den eingeschlagenen Weg fortsetzen zu können. Die Stagnation der Analytik, die bis heute nicht überwunden ist,

4 „Wir [Mathematiker] sind daran gewöhnt zu extrapolieren; das ist ein Mittel, die Zukunft aus der Vergangenheit und aus der Gegenwart abzuleiten“ (Poincaré 1914: 17).

führte in zahlreichen Wissenschaftsdisziplinen zu einem Schisma zwischen Theorie und Empirie. Die analytisch deduzierbaren Folgerungen waren zu simpel, als dass sie praktische Relevanz für die neuen Wissenschaftsbereiche des 19. Jahrhunderts besessen hätten. Die Automatisierung der Extrapolation aber bedeutete, nach der Messung und dem Experiment nun auch die Theorie an Instrumente zu delegieren. Die Mathematisierung, welche die Theorie bereits in ‚symbolische Maschinen‘ (vgl. Krämer 1988, 1991) transformierte hatte, hatte zwar die Voraussetzungen dafür geschaffen. Doch solange ein geeignetes Instrument fehlte, sah sich die Wissenschaft der Stagnation ausgeliefert (vgl. Goldstine, von Neumann 1946). Der frei programmierbare Computer war das gesuchte Instrument, doch erst in den 1940er Jahren gelang es, diese Art von Maschine zu bauen. Denn es ging nicht darum, ein bestimmtes Verfahren zu automatisieren, sondern eine allgemeine Extrapolationsmaschine zu bauen. Dies bedeutete, dass der Zeichengebrauch selbst zu formalisieren und zu mechanisieren war. Vorbild dafür war die Mathematik, ihre rekursive Besonderheit, unendlich viele Zeichen aus einem einzigen Mechanismus (Regel) erzeugen zu können. Sofern sich ein mechanisch ausführbarer Mechanismus für eine bestimmte Folge von Zeichen angeben ließ, hatte man einen Algorithmus zur Beschreibung des durch die Zahlenfolge strukturell dargestellten Gegenstandsbereichs gefunden. Die Delegation dieses Mechanismus an die Maschine erlaubte es nun, die Generierung der Zahlenfolgen fast ins Unendliche weiterzuführen, also zu extrapolieren und somit die aus infinitesimalen Massenpunkten bestehende, physikalische Welt in ihrer Veränderung für ein diskretes Berechnungsraster ein gutes Stück weit zu berechnen.⁵ Was zuvor per Hand nur ein kleines Stück weit in den mathematischen Möglichkeitsraum verlängerbar war, wird durch die steigende Rechenkraft der Computer immer weiter vorangetrieben. Immer zahlreicher lassen sich die Punktbahnen in den mathematischen Möglichkeitsraum hinein errechnen und dadurch zunehmend dichtere, quantitative Bilder des sich entfaltenden Möglichkeitsraumes generieren.⁶

5 Die entscheidende Frage war nun nicht mehr nur, ob es einen solchen Mechanismus gab, sondern ob ein Mechanismus so beschaffen war, dass eine Maschine ihn ausführen konnte und dies in effektiver Zeit (primitive Rekursivität (for-Schleife) und μ -Rekursivität (while-Schleife)).

6 Was 1670 mit Isaac Barrows senkrecht zur Zeitlinie gezogenen, abnehmenden Geraden zur Veranschaulichung von Momentangeschwindigkeiten begann, sind heute dichte Bilder von Projektionen zukünftiger Klimaentwicklungen oder dreidimensionale Animationen von Molekülen (vgl. Barrow 1670; Gramelsberger 2001).

Ob die so erzeugten Trajektorien weiterhin realen Entwicklungslinien entsprechen,⁷ beispielsweise als Projektionen zukünftiger Klimaszenarien, kann durch das neuzeitliche Diktum, wahr mit mathematisch zu identifizieren, allein nicht mehr entschieden werden. Hatte noch Newton optimistisch behauptet, „Hypotheses non fingo!“, so lässt sich dies heute auf Basis automatisierter Extrapolationen nicht mehr so einfach postulieren. Der Grund hierfür ist, dass mit zunehmender Komplexität die Garantie der Determiniertheit der Folgerungen, wie sie für analytisch deduzierte Prognosen gewährleistet war, nicht mehr gilt. Solange sich die mathematisierte Wissenschaft in streng deterministischen Systemen bewegt, lässt sich berechenbar mit wahr gleichsetzen. Doch sobald sie diese Systeme hinter sich lässt, kann dieses Evidenzkriterium nicht mehr als alleiniges aufrechterhalten werden, denn der eindeutige Zusammenhang zwischen Annahmen und Schlussfolgerungen ist in komplexen Systemen nicht mehr gegeben.⁸ Dadurch ist es nicht immer entscheidbar, ob Extrapolationen ins Fiktive laufen oder ob der extrapolierte Möglichkeitsraum tatsächliche Entwicklungen beschreibt.⁹ Dies bedeutet, dass nicht mehr allein die Quantifizierbarkeit und Berechenbarkeit, wie seit Newton und Leibniz gefordert, das alleinige Evidenzkriterium sein kann, da es an Kohärenz verloren hat, vielmehr bedarf es neuer Evaluationsstrategien. Das Beispiel der Klimamodellierung zeigt, welche Versuche aktuell unternommen werden, um solche neuen Strategien zu gewinnen. Obwohl die Simulationswissenschaften erst am Beginn der Entwicklung stehen, lassen sich doch einige interessante Beobachtungen machen.

Zum einen ist absehbar, dass sich der strenge Kohärenzanspruch für komplexe Systeme nicht wiedergewinnen lassen wird und der Traum vom sicheren Wissen ausgeträumt ist. Doch dieser Traum ist bereits seit 1889 ausgeträumt (vgl. Poincaré 1891) und das zu Recht, denn der Tribut war zu hoch: Nur stark idealisierte Systeme konnten dem streng deterministischen Anspruch gerecht werden. Doch solche Systeme lassen sich selten in Anwendungskontexten finden. Das bedeutet, dass unsiche-

-
- 7 Ob die erzeugten strukturellen Ordnungen von Mannigfaltigkeiten tatsächlich empirischen Sachverhalten wie Messwerten entsprechen, lässt sich aufgrund der Möglichkeit ihrer Berechenbarkeit nicht entscheiden.
 - 8 Dies bedeutet nicht, dass die aktuelle Naturwissenschaft das alte Diktum aufgegeben hätte, aber sein Evidenzanspruch ist geschwächt und muss durch neue Evaluationsstrategien gestützt werden.
 - 9 Dies ist der Grund, warum jeder Simulationslauf eines Computerexperiments mit einem höherer aufgelösten Testlauf verglichen wird. Verhalten sich die Resultate stabil, selbst bei höher Auflösung des Berechnungsgitters, dann kann davon ausgegangen werden, dass man sich der exakten, aber unbekannten Lösung annähert.

re Prognosen zur approximativen Logik der Computereperimente gehören, dass sich aber der Grad der Unsicherheit zunehmend durch Metriken bestimmen lässt. Das Vorgehen der Klimaforschung anlässlich der beiden letzten IPCC Berichte zeigt, wie mühsam und aufwendig es ist, solche Metriken auf Komponenten- und Systemebene zu entwickeln. Doch es ist derzeit der beste Weg, um den Mangel an Kohärenz durch einen gewissen Grad an Kohäsion auszugleichen. Während die Kohärenz sich automatisch aus der Strenge des Verfahrens – beispielsweise der Deduktion – ergibt, muss die Kohäsion hergestellt werden.¹⁰ Forschungspraktisch bedeutet dies, Modelle unter standardisierten Bedingungen zu testen und zu vergleichen, um Resultate zu erzielen, die als ‚likely‘ und unter besten Bedingungen als ‚very likely‘ einzustufen sind, also mit 66- bis 90-prozentiger oder gar mit mehr als 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit eintreten. Die Analyse der Klimaforschung hat auch gezeigt, dass eine hohe Kohäsion zwischen Projektionen und tatsächlichen Entwicklungen nur unter bestimmten Bedingungen zu erreichen ist. Es erfordert einen gewissen Grad an Standardisierung, an Vergleichbarkeit der verschiedenen in-silico Experimentalsysteme sowie an Referenzdaten, basierend auf einer relativ guten Datenlage an empirischen Informationen. Oder in den Worten Vilhelm Bjerknes: „1. Man muß mit hinreichender Genauigkeit den Zustand der Atmosphäre zu einer gewissen Zeit kennen“ (Bjerknes 1904: 1). Desweiteren setzt eine hohe Kohäsion ein relatives Vertrauen in die zugrundeliegenden Theorien voraus. Im Falle der Meteorologie gilt das Motto: Je physikalischer ein Prozess beschrieben und modelliert werden kann, desto besser. Dabei recurriert die physikalische Beschreibbarkeit auf first principles, also auf Newtons Mechanik. Noch einmal mit Bjerknes gesprochen: „2. Man muß mit hin-

10 Der Begriff der Kohäsion ist der Literaturwissenschaft entlehnt, die damit den textlichen Zusammenhalt, im Unterschied zur inhärenten Struktur (Kohärenz des Textes), bezeichnet. Im vorliegenden Falle wäre zwischen einer Kohärenz des Verfahrens (analytische Deduktion zur Generierung von Aussagen) und der Kohärenz zwischen diesen Aussagen und dem, worauf sich die Aussagen beziehen (untersuchtes Realsystem) zu unterscheiden. Letztere wird bislang in den mathematisierten Naturwissenschaften als strukturelle Isomorphie der Gesetze durch Experiment und Messung als hinreichend begründet angesehen. Im Falle der Kohäsion gestaltet sich die Situation schwieriger, aber auch hier geht es zum einen um die Kohäsion des Verfahrens, beispielsweise durch Modellvergleich und Evaluation getesteter Simulationsmodelle, aber auch um die Kohäsion der mit Computereperimenten generierten Aussagen und den untersuchten Realsystemen. Dass trotz der schwächeren Evidenzbedingungen der Kohäsion die grundlegende Voraussetzung der strukturellen Isomorphie zwischen mathematischer Beschreibung und Welt in Frage gestellt wird, lässt sich in den Computational Sciences nicht beobachten.

reichender Genauigkeit die Gesetze kennen, nach denen sich der eine atmosphärische Zustand aus dem anderen entwickelt“ (Bjerknes 1904: 1). Dies zeigt, dass Computerexperimente zwar neue Berechnungsinstrumente sind, dass sie aber im Falle der deterministischen Simulation nach wie vor im klassischen Wissenschaftsverständnis der Neuzeit verankert sind. Mit diesem Ansatz geht in der Regel ein entsprechendes Systemverständnis der simulierenden Wissenschaft einher. Klima als System verstanden, lässt sich in Subsysteme unterteilen, die den grundlegenden Gesetzen ebenso folgen, wie das Gesamtsystem. Anders gewendet: Digitales Klima lässt sich aus vielen Subsystemen konstruieren und modellieren, die alle miteinander in Interaktion stehen. Erdsysteme sind die besten Beispiele hierfür.¹¹ Schließlich liegt es zwar in der approximativen Logik der Computerexperimente begründet, dass die Determiniertheit der Folgerungen nicht mehr gegeben ist und dass die exakte, aber unbekannte Lösung für ein Berechnungsraster nur angenähert werden kann. Aber auch hierfür haben sich mit den Stabilitätsanforderungen (vgl. von Neumann, Richmyer 1947) und den Konvergenztests Metriken entwickelt, welche es erlauben, die Güte der approximierten Resultate zu testen und zu beurteilen. Zwar handelt es sich dabei um Erfahrungswerte und sozusagen ‚empirische Tests‘, die jeglicher strengen Beweiskraft entbehren, die sich aber in der Forschungspraxis als gangbarer Weg herauskristallisiert haben, wie der Laxsche Äquivalenzsatz dokumentiert.

Das bisher behandelte Beispiel der Klimamodellierung und die aufgezeigten allgemeinen Bedingungen nehmen Bezug auf eine bestimmte Klasse von Computerexperimenten: Deterministische Simulationen auf Basis partieller Differentialgleichungen, die sich seit dem 17. Jahrhundert mit der Entwicklung des Differentialkalküls für die Beschreibung von Prozessen in den Naturwissenschaften etabliert haben. Auch wenn diese Klasse von Computerexperimenten sicherlich die am meisten genutzte ist, so gibt es weitere Arten, die auf anderen mathematischen Verfahren basieren (vgl. Gramelsberger 2004). Stochastische Simulationen wie die Monte-Carlo-Simulation gehören ebenso dazu (vgl. Galison 1996), wie probabilistische Simulationen, die auch in der Klimamodellierung eingesetzt werden und Klima als ein rein statistisches und nicht als ein deterministisches Phänomen begreifen (vgl. Murphy 1998). In der Chemie lassen sich quantenmechanische Simulationen finden, die auf den Schrödinger-Gleichungen basieren und diese entweder stochas-

11 Es gilt jedoch erhebliche Einpassungsprobleme zu überwinden, zum einen bezüglich Parametrisierungen, zum anderen bezüglich Subsystemen, die anderen Gesetzen folgen.

tisch mit Hilfe der Quanten-Monte-Carlo-Simulation, quantenmechanisch mit Ab-initio Verfahren oder quasi-deterministisch lösen.¹²

Seit einiger Zeit gibt es zudem Verfahren des sogenannten Soft Computing, mit welchen sich für bestimmte Fragestellungen Computerexperimente durchführen lassen. Zu diesen Verfahren gehören Genetische Algorithmen für Optimierungs- und Selektionsprobleme, Künstliche Neuronale Netze oder Zelluläre Automaten für Regelungs-, Bewertungs- und Mustererkennungsaufgaben, Bayesian Networks zur Simulation von Einstellungen und Annahmen für Schlussfolgerungen sowie Multiagentensimulationen für Interaktionsaufgaben. Diese Verfahren findet man in spezifischen Anwendungsbereichen unterschiedlicher Disziplinen, die auch als Complexity Sciences bezeichnet werden, beispielsweise in den Sozialwissenschaften zur Simulation von Aushandlungsprozessen, in der Medizin zur Automatisierung der Datenauswertung, in den Wirtschaftswissenschaften zur Simulation von Verbraucherverhalten aber auch in der Physik zum Studium instabiler Systeme. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich auf Basis einfacher Regeln komplexes Verhalten generieren lässt.¹³

-
- 12 In der Chemie bedarf es Simulationsverfahren, die die Wechselwirkungen aller Elektronen berücksichtigen. In der Regel basiert die potenzielle Energie der Teilchen dabei nicht auf experimentell ermittelten Werten, sondern wird mit iterativen Verfahren errechnet (Ab-initio Methoden). Indem die Wechselwirkung eines Elektrons so behandelt wird, als bewege es sich in einem mittleren, elektrostatischen Feld (lokale Dichtefunktionsmethode), erhält man durch iterative Berechnungen ein System der geringsten Energie. Dies ist für Aussagen über chemische Reaktionsraten von Bedeutung. Für größere Moleküle wären die Ab-initio Methoden zu aufwendig. Deshalb findet hier eine Mischung aus klassischen und quantenmechanischen Verfahren Anwendung. Moleküle werden dabei als System aus Massenzentren (Atome) dargestellt, die sich in einem durch Wechselwirkungen erzeugtem Kraftfeld bewegen. Nachdem die Kraftfelder ermittelt sind, lassen sich die Molekülbewegungen wie Verdrehungen, Verformungen oder Vibrationen mit den Newtonschen Bewegungsgesetzen ermitteln.
- 13 Soft Computing (vgl. beispielsweise zum Perceptron, dem Vorläufer neuronaler Netze, Rosenblatt 1958 versus Minsky, Papert 1969; zu zellulären Automaten von Neumann 1951; Ulam 1960; von Neumann, Burks 1966; zu Bayesian Networks Bayes 1763; Pearl 1985, 2000; zu Fuzzy Logik Zadeh 1965, 1994; zu genetischen Algorithmen Holland 1975; zu anderen Artificial Intelligence Verfahren Bond, Gasser 1988; European Centre for Soft Computing 2009; zur Simulation in den Sozialwissenschaften Klüver 1995; Conte 1997). Schwarmsimulationen (vgl. Beni, Wang 1989), fraktale Geometrien (vgl. Mandelbrot 1982) oder L-Systeme (vgl. Rozenberg, Salomaa 1980; Prusinkiewicz, Lindenmayer 1990) sind weitere und vor allem illustrative Beispiele des Soft Computing.

Vergleichsbeispiele

Vergleicht man nun den Status quo des Umgangs mit deterministischen in-silico Experimentalsystemen und den entsprechenden Computorexperimenten in den verschiedenen Computational Sciences, so zeigen sich unterschiedliche Verortungen, wenn es um Standardisierungen, neue Evaluationsstrategien, das mathematisierbare Systemverständnis sowie geeignete Konvergenzbedingungen geht. Gute Vergleichsbeispiele zur Klimamodellierung liefern die Gravitationsphysik und die Zellbiologie.¹⁴

Die Gravitationsphysik kann als einzige Naturwissenschaft auf ein geschlossenes Theoriesystem zurückgreifen: auf Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie. Für Simulationen in diesem Bereich, beispielsweise um die Gravitationswellen kosmischer Ereignisse wie den Zusammenstoß zweier schwarzer Löcher zu simulieren, lässt sich Einsteins Theorie in Form von zehn partiellen Differentialgleichungen formulieren. Es handelt sich um „ein gekoppeltes, nicht-lineares System und jede Gleichung hat mehrere hundert Terme“ (Interview A 2004). Damit erfüllt die Gravitationsphysik einen ähnlich hohen Grad an mathematisierbarem Systemverständnis wie die Meteorologie, beide basieren auf first principles wenn auch unterschiedlicher Art. Dieses System an Differentialgleichungen bildet die Basis des mathematischen Modells der in-silico Experimentalsysteme. Allerdings entbehrt die Gravitationsphysik im Unterschied zur Meteorologie jeglicher Messdaten. Die Folge ist, dass es keine Möglichkeit der empirischen Evaluation der Computorexperimente gibt und dass keine Informationen zu realistischen Rand- und Anfangsbedingungen sowie zur Justierung wichtiger Parametrisierungen zur Verfügung stehen. Man kennt den Zustand des Ereignisses, das man simulieren möchte, nicht.

„Unser Problem ist das schwarze Loch und die Singularität. Wir müssen es umgehen, um damit zu arbeiten. D.h. wir benutzen besondere Techniken wie Singularity Excision. Wir schneiden das Zentrum des schwarzen Loches in der Simulation heraus, d.h. das schwarze Loch steht nicht drin. Oder wir müssen Randbedingungen auf das Loch setzen, die physikalisch zutreffend sein sollten. Aber wir kennen die Physik dort nicht. Wir haben nur die Gleichungen,

14 In beiden Bereichen wurden Interviews geführt. Ein Interview (Interview A) mit einem Modellierer aus der Gravitationsphysik sowie zwei Interviews mit Zellbiologen, hier bezeichnet als Interview B und Interview C sowie weiterer Gespräche mit Biologen. Interview A und B sind in Auszügen bereits veröffentlicht (vgl. Gramelsberger 2004).

aber wir kennen die realistischen Randbedingungen nicht. Aber aus dem schwarzen Loch, das wir in der Simulation ausschneiden, darf eigentlich keine physikalische Information herauskommen. Wir können sehr einfach mit den Randbedingungen umgehen, auch wenn sie nicht physikalisch sind: Die Informationen dürfen nicht aus dem schwarzen Loch gelangen“ (Interview A, 2004).

Ziel des Computereperiments ist eine Beschreibung der typischen Raum-Zeit-Krümmung für ein spezifisches Ereignis. Denn die Veränderung der Raum-Zeit-Geometrie selbst ist Gegenstand der gravitationsphysikalischen Forschung. Da man keine Messdaten hat, lassen sich weder die Zuverlässigkeit des in-silico Experimentalsystems noch die der Resultate überprüfen. Allerdings kann die Gravitationsphysik auf ein Referenzbeispiel zurückgreifen, auf eine exakte Lösung von Einsteins Gleichungen für ein einzelnes schwarzes Loch (Schwarzschild-Lösung). Damit lässt sich das Experimentalsystem zumindest für diesen einfachen Fall evaluieren. Doch „für dynamische Raumzeiten gibt es keine exakten Lösungen. Wir können also nicht mit einer exakten Lösung vergleichen, d.h. wir müssen darauf vertrauen, dass unsere Simulation richtig ist“ (Interview A, 2004).¹⁵ Da sich die Simulationen für den Zusammenstoß zweier schwarzer Löcher jedoch extrem instabil verhalten, sind die Ergebnisse noch wenig vertrauenswürdig. Zudem gibt es weltweit nur einige Forschergruppen, die solche Computereperimente durchführen. Koordinierte Standardisierungsbemühungen sind also nicht zu erwarten, geschweige denn ein Modellvergleich. Pikant wird dies vor dem Hintergrund, dass die Gravitationsphysik im Begriff ist, sich zu einer experimentellen Wissenschaft zu entwickeln. Weltweit befinden sich dazu vier Gravitationsdetektoren im Testbetrieb, unter anderem in Hannover.

„Wir arbeiten mit dem GEO 600 Teleskop in Hannover zusammen, die Gravitationswellen messen möchten. Wir sollen realistische Wellenformen simulieren, damit sie es mit ihren Daten vergleichen können. [...] In Hannover und in den USA gibt es Detektoren. Sie messen erst seit ein paar Monaten. Das Signal der Gravitationswellen ist ziemlich schwach. Sie haben viel Rauschen in

15 Die Richtigkeit wird rein mathematisch geprüft: „Wir benutzen Konvergenztests. Wenn man die Gleichung auf einem Gitter mit ‚finite differencing‘ schreibt, erhält man einen Fehler, der abhängig von der Gittergröße ist. Geht man auf ein kleineres Gitter mit höherer Auflösung, hat man einen kleineren Fehler usf. Wenn man auf drei verschiedenen Gittergrößen simuliert, kann man die relativen Fehler zwischen den dreien messen. [...] Mit drei Auflösungen kann man sehen, ob man in die richtige Richtung geht, ob alle drei Auflösungen auf dieselbe Lösung konvergieren“ (Interview A, 2004).

ihrem Detektor und wenig Signal. Sie müssen irgendwie das Signal aus dem Rauschen herausfiltern. Sie hoffen, dass sie Gravitationswellensimulation dafür benutzen können, um das Signal vom Rauschen effektiver unterscheiden zu können. Das ist der Grund warum wir ziemlich akkurate Simulationen brauchen. Das Signal-Processing-Problem ist ziemlich schwierig. Sie brauchen akkurate Wellenformen. [...] Andererseits, wenn sie ein Signal finden, möchten sie wissen, was für ein System sie gesehen haben. D.h. sie benötigen eine Simulation, die ihnen sagt, das waren zwei schwarze Löcher mit dieser Masse und solcher Geschwindigkeit“ (Interview A, 2004).

Eine ganz andere Situation der in-silico Experimentalsysteme und der Computerexperimente mit ihnen findet sich in der Zellbiologie. Trotz des zunehmenden Systemverständnisses gibt es keine first principles, welche die grundlegenden Prozesse in einer Zelle beschreiben. Hinzu kommt, dass Zellen im Unterschied zu schwarzen Löchern oder der Atmosphäre hochgradig offene Systeme sind, deren Zustand maßgeblich vom umgebenden Milieu abhängt. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass in Zellen verschiedene Kreisläufe wirken, die miteinander in komplexer Wechselwirkung stehen. Bei einem Systemverständnis muss daher von verschiedenen Systemen ausgegangen werden, die allerdings nicht unbedingt denselben Gesetzen unterliegen müssen. Möchte man etwas über gesteuerte Prozesse in der Zelle herausfinden, gilt es verschiedene Fragen zu beantworten.

„Erstens, ist das Gen überhaupt da? Zweitens, ist das Gen überhaupt aktiv? Dann wäre man bei den Microarrays. Dritte Ebene: Die Gene kodieren für Proteine. Ist das Protein da? Vierte Ebene wäre, ist das Protein aktiv? Fünfte Ebene: Viele dieser Proteinen sind Enzyme, die Stoffwechselreaktionen beschleunigen. Für so eine Reaktion braucht man ein Edukt und es kommt ein Produkt heraus, manchmal auch mehrere Edukte oder Produkte. Ist das Protein nicht nur da, sondern sind auch die Edukte ausreichend vorhanden? Dann wäre man bei dem, was man gemeinhin Metabolomics nennt. Wenn man dann noch eine Ebene weiter runter geht: Wie ist das mit den Stoff-Flüssen? Nicht nur, wie viel von meinem Edukt habe ich und ist mein Protein aktiv, sondern wie viel Edukt pro Zeit setzt es denn um? Dann hat man eigentlich den kompletten Überblick.“ (Interview C, 2007).

Das Ausmaß der Komplexität in der Zellforschung wird an folgendem Beispiel weiter verdeutlicht: Möchte man in einem Laborexperiment herausfinden, ob ein bestimmter Stoffwechselprozess die Generierung eines bestimmten Proteins gegenüber einem anderen Prozess begünstigt, lassen sich zwei Vergleichssysteme herstellen, deren Proteinentwicklung dann mit Hilfe von Proteinanalysen nachvollzogen werden kann. Im ein-

fachsten Falle würden sich beide Proteinanalysen bis auf ein Protein gleichen. Doch die Realität im Laboralltag ist eine andere. „Das passiert aber nie, leider. Man kann nicht alle Proteine auflösen mit der derzeitigen Technologie, aber wir können ungefähr 1000 bis 1200 Proteine auflösen. Und wenn wir uns dann ansehen, wie viele von ihnen unterschiedlich sind [...] ja, dann sind fast 600 unterschiedlich. D.h., es passiert eine ganze Menge und das meiste davon wird wahrscheinlich nichts mit dieser Änderung in der Produktbildung zu tun haben. Jetzt gilt es natürlich herauszufinden, welche sind denn das. Das sind so Punkte, wo man dann ohne Bioinformatik eigentlich nicht mehr weiterkommt“ (Interview C, 2007). Nachdem sich ein Teil der 600 Proteine identifizieren ließ, beginnt die eigentliche Forschungsarbeit.¹⁶

„Jetzt redet man mit den Zellbiologen, was wisst ihr über dieses Protein? Womit wechselwirkt es? In welchen Fällen ist das stark oder schwach? Gibt es Erfahrungen, die wir auf unseren Prozess übertragen können? Damit man wie so ein Mosaik das irgendwann aufbauen kann: Dieser Prozess wird in der Zelle ausgelöst und jener und von dem zweigt sicher aber noch was ab, weil das mit Sicherheit ziemlich verschachtelte Netzwerke sein werden. Es reicht auch nicht, wenn man alles nur einmal macht, sondern man muss es natürlich wiederholen. So ein Verfahren ist nie identisch, [...] denn es ist lebende Materie mit der man arbeitet. Die verhält sich niemals gleich. Kleinste Unterschiede führen unter Umständen zu deutlichen Änderungen und das wirkt sich später auch in diesem Muster aus. Insofern haben wir erstmal eine ganze Reihe von Wiederholungen gemacht. [...]

Das ist der Status quo im Moment: Man erkennt, wie stark selbst Kleinigkeiten solche Netzwerke beeinflussen und damit werden wir wahrscheinlich die nächsten 10, 15 Jahre noch mit zu tun haben. Wir sind jetzt dazu übergegangen, uns noch stärker um diesen Bereich zu kümmern und stattdessen die Zahl der Prozesse, die wir untersuchen, zu reduzieren. [...] Wir versuchen möglichst viele von diesen funktionellen Genom-Analysemethoden auf diese drei verschiedenen Beispiele anzuwenden, um wenigstens die Variationsbreite auf

16 „Früher musste man sagen, na ja ich interessiere mich für zwei oder drei Proteine und die untersuche ich jetzt im Detail. Das geht bei so einer Flut überhaupt nicht. Man muss von diesen fast 600 Proteinen sehen: Wie viele kann ich denn überhaupt identifiziert? D.h., man muss diesen kleinen Fleck dann ausstechen und dann kann man das Protein – nach entsprechender Vorbehandlung im Massenspektrometer – hoffentlich vielleicht nachweisen. Je mehr genomische Informationen man hat, desto leichter ist das. Also bei Maus oder Mensch kommt man durchaus auf 50 bis 60 Prozent Trefferquote. Da sind wir noch deutlich von weg, wir haben jetzt von diesen 600 [Hamster-Proteinen], 120 oder 130 identifiziert, damit fängt die eigentliche Arbeit aber jetzt erst an“ (Interview C, 2007).

der Prozessseite möglichst klein zu halten. [...] Also man versucht aus diesen extrem komplexen Netzen [...] Ausschnitte herauszunehmen und zu verstehen, welche Proteine eine Rolle spielen, insbesondere Enzyme. Welche Enzyme katalysieren welche Reaktionen, welche Edukte sind relevant, welche Produkte sind relevant. Man möchte möglichst viele quantitative Informationen bekommen, um dann sagen zu können, jetzt müssen wir bestimmte Experimente machen. (Oder Computerexperimente?) Die Modellierung gibt mir immer ein Ergebnis, aber es würde nicht stimmen, weil Reaktionen fehlen. Denn wenn ich dem Computer sage, ich habe hier mein Netzwerk und ich vergesse diesen Abzweig da, dann rechnet der Computer natürlich aus, wie sich das verteilt. Aber es fehlt etwas, d.h. das was herauskommt ist falsch. [...] Da sind nun Markierungsexperimente [mit Kohlenstoff-13 markierter Glukose] ganz gut, denn ich sehe, wie viele Markierungen rein gehen, wie viel kommt unten an. Wenn das unten weniger ist, dann wurde irgendwo [im Computermodell] etwas vergessen. Das ist aber bei dieser Komplexität nicht so einfach. Wir fangen gerade erst an, das in Modelle umzusetzen“ (Interview C, 2007).

Im Unterschied zur Meteorologie beginnt die Zellsimulation nicht mit einem übergeordneten, generellen Ansatz der Prozesse (globale Zirkulation), um dann in Form von Sub-Modellen (z.B. Ozean, Eis, Vegetation) und Parametrisierungen (z.B. Wolken) immer detailreichere in-silico Experimentalsysteme zu kreieren. Zellsimulationen folgen eher einem ‚bottom-up‘ Prinzip. Es gibt eine unüberschaubare Anzahl von Modellen zu sehr spezifischen Teilprozessen der Zelle. Das führt zu dem Problem, – wie ein Zellbiologe in einem Gespräch darlegte – dass es kaum Vergleichsmöglichkeiten für diese Fülle an Modellen gibt. Sie sind zu spezifisch. Auch lassen sich diese Modelle nicht als Module eines Zellsystems, ähnlich einem Erdsystem, nutzen. Es gibt zwar Ansätze, die Modellierungssprache zu vereinheitlichen und dadurch die Modelle kompatibler zu gestalten, aber diese konnten sich bisher noch nicht durchsetzen. Nichtsdestotrotz ist es auch in der Zellbiologie das Ziel, die e-Cell zu programmieren (vgl. e-Cell Initiative 2009). „Das Idealmodell wäre eigentlich ein wirklich komplettes Abbild der Zelle, was es mir erlaubt jegliches Experiment vorweg zu nehmen. [...] So ein Modell wäre dann in der Lage zu sagen, bei soviel Medium und der Nährstoffmenge da drin, wachsen die Zellen so und so schnell zu der und der Zelldichte heran, produzieren so und so viel Produkt, so und so viel Stoffwechselabfallprodukte. [...] Ich weiß nicht, ob man jemals so weit kommt, ich glaube nicht. Also man soll nie ‚nie‘ sagen, aber ich glaube nicht, dass ich das noch in meiner Laufbahn erleben werde“ (Interview C, 2007).

Derzeit werden in der Zellbiologie große Anstrengungen unternommen, um die relevanten Parameter der Zellprozesse durch Laborexperimente zu identifizieren und zu quantifizieren, um sie schließlich model-

lieren und simulieren zu können. Es wird vermutet, – so ein Zellbiologe im Gespräch – dass nur rund dreißig Prozent der Zellprozesse bekannt sind. Zudem wurden diese Prozesse an einer Vielzahl unterschiedlicher Modellorganismen erforscht, angefangen von Bakterien, über Mäuse und Hamster, zu menschlichen Zellen wie beispielsweise Leberzellen. In wieweit diese Ergebnisse anhand unterschiedlicher Zellen miteinander vergleichbar und nutzbar sind, lässt sich nicht beantworten. „Erstens sind die Schemata nicht komplett, die die Biologen experimentell bestimmen. Man vergisst Interaktionen. Sie sind nicht vollständig und wenn sie vollständig sind, sind sie unüberschaubar. [...] Und zweitens sind viele Parameter – Zerfallsraten, Reaktionskonstanten, Temperaturabhängigkeiten – nicht bekannt“ (Interview B, 2004). Für die Simulation selbst einzelner Zellprozesse bedeutet dies: „Man muss bei der Simulation die Parameter oft erst einmal raten bzw. vernünftig wählen. Die Daten fehlen. Damit ist die Simulation mehr eine Karikatur der wirklichen Prozesse. Aber eine gute Karikatur betont das Wesentliche und damit kann man trotzdem etwas über die Prozesse lernen“ (Interview B, 2004).¹⁷ Die Arbeit mit diesen Modelle und Simulationen hat für die Forschung jedoch einen entscheidenden Vorteil:

„Das ist das angestrebte Ziel: Ein Loop. Man lernt vom Experimentator: Was ist das Problem? Was weiß man? Er hat in der Regel einen sehr guten Literaturüberblick. Dann simuliert man mehr oder weniger ins Blaue. Man stellt dumme Fragen an den Experimentator. Das ist vielleicht das Wichtigste und er antwortet dann typischerweise: Das habe ich mir noch nie überlegt? Ist das denn so wichtig? Zum Beispiel: Wie groß sind die Konzentrationen verschiedener Signalmoleküle? Kann man das deterministisch oder stochastisch simulieren? Ist der Feedback überhaupt schnell genug für das System? Wie lange dauert das? Was für eine Funktion ist das, mit der sich die Aggregate bilden? Usw. Das sind typische Fragen der Theoretiker, die bei der Modellierung benötigt werden und die oft nicht im Mittelpunkt der experimentellen Untersuchung stehen. Dann wird nachgedacht und es stellt sich heraus, das sind interessante Fragen. Man kann wirklich eine Menge lernen, wenn man das sorgfält-

17 Referiert wird hier auf reaktionskinetische Simulationen: „Die Simulation von reaktionskinetischen Systemen hat eine lange Tradition in der Chemie. Daran knüpfen wir an. Man kann eine Zerfallsreaktion durch eine Exponentialfunktion approximieren, die durch eine Differentialgleichung den Zerfall beschreibt. Man kann eine bimolekulare Reaktion durch ein Produkt der beiden Konzentrationen beschreiben und enzymatische Reaktionen mit der Michaelis-Menten-Kinetik. Letztendlich, wenn man ein Schema der Reaktionen hat - Diagrammzeichnungen mit Pfeilen, Reaktionen und Rückkopplungen - dann ist es für einen Theoretiker relativ einfach, dieses Schema in Differentialgleichungen zu übersetzen“ (Interview B, 2004).

tig misst. Und dann werden die Experimente entworfen, meistens gemeinsam“ (Interview B, 2004).

Die Heterogenität der Beispiele zeigt, dass sich nicht nur die forschungspraktische Bedeutung der Computereperimente in den einzelnen Disziplinen unterscheidet, sondern dass sich aus der jeweils spezifischen Einbettung der Simulation in das disziplinäre Setting von Theorie, Experiment, Messung und Beobachtung die Relevanz der mit Simulationen produzierten Resultate ableitet. Wenn, wie in der Wettervorhersage eine gute Grundlage empirischer Daten, Modelle, die auf grundlegenden Theorien basieren, eine Infrastruktur der Standardisierung und des Austauschs vorhanden sind und adäquate Evaluationsstrategien entwickelt wurden, dann lassen sich mit solchen Simulationsmodellen Kurzzeitvorhersagen mit hoher Aussagekraft erreichen. Dies ist im Grunde erstaunlich, denn Wettersimulationen als die paradigmatischen deterministischen Simulationen sind aufgrund ihrer sensitiven Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen problematische Simulationen.¹⁸ Es waren gerade die Wettersimulationen, die in den 1960er Jahren das Problem der prinzipiellen Instabilität der Prognosen ins Bewusstsein der Wissenschaftler brachten (vgl. Lorenz 1963). Zwar ist das Problem der Instabilität in komplexen Systemen spätestens seit Henri Poincarés Arbeit über die Instabilität des Sonnensystems bekannt (vgl. Poincaré 1891), doch erst mit den Computereperimenten bekommt die Instabilität des Verhaltens komplexer Systeme eine zentrale Bedeutung für die Forschung, da die Aussagekraft der berechneten Prognosen problematisch wird. In seinem Buch *Instabilitäten in Natur und Wissenschaft* unterscheidet Jan Schmidt drei Arten prinzipieller Instabilität.

„Von *statischer Instabilität* kann gesprochen werden, wenn ähnliche Anfangsbedingungen während der Zeitentwicklung auseinanderlaufen und sich niemals mehr annähern, so wie dies bei der dynamischen Instabilität der Fall ist. Der populäre Begriff des deterministischen Chaos bezeichnet die *dynamische Instabilität* der kontinuierlichen sensitiven Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Bei der dynamischen Instabilität steht die Dynamik kontinuierlich auf ‚Messers Schneide‘; bei der statischen Instabilität ist dies lediglich der Fall auf die Anfangspunkte bezogen. [...] Doch neben diesen gibt es einen weiteren, viel fundamentaleren Typ von Instabilität, welcher in seiner physikalischen Relevanz bislang kaum eine grundlegende, wissenschaftstheoretische Reflexion erfahren hat und der auf das Modell- und Theorieverständnis der Physik zielt: die *strukturelle Instabilität*. Hier geht es um die Instabilität der

18 Im Unterschied zu Wettersimulationen sind Klimasimulationen nicht von Anfangsbedingungen sensitiv abhängig, sondern von Randbedingungen.

Gesetze selbst bzw. um deren Gesamtdynamik, d.h. um die Instabilität der Gleichungen unter ihren kleinsten Veränderungen, etwa unter Parameterveränderungen“ (Schmidt 2008: 93).

Aus diesen Bedingungen beziehen die Konvergenztests ihre Bedeutung für die Forschung mit Computereperimenten. Wie am Beispiel der Klimasimulation dargelegt, folgt jedem Experimentallauf ein Testlauf in höherer Auflösung. Im Falle der gravitationsphysikalischen Simulation gibt es noch weitere Testmöglichkeiten, beispielsweise die Überprüfung der Simulationsergebnisse an einem einfachen, aber analytisch gelösten Fall wie der Schwarzschild-Lösung oder den Abgleich mit Gleichungen zur Überprüfung.

„Wir haben Instabilitäten und können zwei schwarze Löcher nur für eine bestimmte Zeit simulieren. Die ‚evolution equations‘ sagen uns, wie man von den Daten eines Zeitpunktes zum nächsten kommt. Aber wir haben auch ‚constrained equations‘, die zufriedenstellend gelöst werden müssen. Wenn wir in der Zeit vorwärts gehen, können wir die ‚constrained equations‘ rechnen und sehen, ob wir sie immer noch zufriedenstellend lösen. Wenn nicht, wissen wir, dass wir uns mit den ‚evolution equations‘ von Einsteins Gleichungen entfernen. Wir benutzen die ‚evolution equations‘, um vorwärts zu gehen, mit den ‚constrained equations‘ können wir sehen, ob wir Einsteins Gleichungen lösen. Wenn die ‚constrained equations‘ richtig sind, wissen wir, dass wir immerhin noch Einsteins Gleichungen lösen“ (Interview A, 2004).

Konvergenztests und Abgleiche mit analytischen Lösungen gehören daher zur mathematischen Praktik des Computereperimentierens. Unter Umständen lassen sich Computereperimente in ein Beziehungssystem von Bedingungen einordnen, das Aussagen über ihren Erkenntniswert liefert. Ein solches ‚framework of cohesion‘, wie man es nennen könnte und es in Abbildung 21 skizziert ist, müsste folgende Skalen umfassen: Skala der Standardisierung, des umsetzbaren Systemverständnisses, der Evaluationsstrategien und der Konvergenzbedingungen. Aus diesem Bezugssystem könnte sich dann eine Matrix des Erkenntniswertes und der Prognosekraft ergeben. Es könnte sich aber auch die weitere Entwicklungsrichtung einer Disziplin ableiten lassen, die sie beschreiten müsste, um den Erkenntniswert und die Prognosegüte ihrer Computereperimente zu erhöhen. Durch diese Entwicklungsrichtung wird auch die Tendenz zur Vereinheitlichung von Wissenschaft durch den Computer deutlich, denn um diese simulationsadäquaten Entwicklungen zu erreichen, bedarf es der strukturellen Anpassung der Wissensbestände einer Disziplin an deren Quantifizierbarkeit und Mathematisierbarkeit.

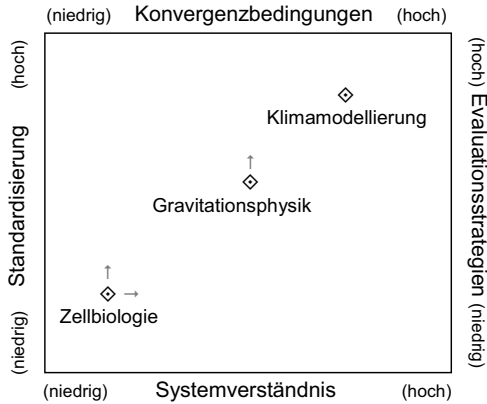


Abbildung 21: *Framework of Cohesion*
(Gramelsberger 2009)

Erkenntniswert

Die drei Beispiele machen deutlich, dass Computerexperimente analog den Experimenten als „[a] class of practises that naturally correspond to the label scientific [computational] experimentation“ (Dear 1995: 12) zu bezeichnen sind. Das Computerexperiment oder das in-silico Experimentalsystem schlechthin gibt es nicht. Computerexperimente sind sehr variable Instrumente der Wissensproduktion, die nur eines gemeinsam haben, nämlich dass sie auf Computern laufen. Und dennoch unterscheiden sie sich von simplen Berechnungen oder von Computerspielen. Doch was kennzeichnet sie und welchen Erkenntniswert tragen sie zur Forschung bei? Bislang wurden vor allem forschungspraktische Aspekte der Computerexperimente beleuchtet. Das kommt nicht von ungefähr, denn es geht in dieser Studie vor allem darum, die Tradition dieser neuen Erkenntnisinstrumente zu rekonstruieren sowie den Umgang mit ihnen in der aktuellen Forschung und die damit einhergehenden Transformationen zur e-Science zu beleuchten. Doch eine wissenschaftsphilosophische Verortung der Computerexperimente geht über solche forschungspraktische Aspekte hinaus, insofern sie die Epistemologie der Computerexperimente als Erkenntnisinstrumente analysiert. Eine solche Verortung knüpft einerseits an die wissenschaftstheoretischen Diskurse zum Verhältnis von Theorien, Modellen und Phänomenen an, insbesondere an Überlegungen zu mathematischen Modellen und Simulationen, andererseits an (Computer)-Laborstudien. Anhand der beiden oben genannten Fragen werden einige Positionen der aktuellen Debatte zur Si-

mulationen untersucht. Was jedoch generell bei der Lektüre auffällt ist, dass dem Computer selbst in seiner Notwendigkeit zur Algorithmierung von Theorie keine wirkliche Beachtung geschenkt wird. Dies zeigt sich insbesondere darin, dass zwischen Theorie, mathematischem Modell, algorithmiertem Modell (in-silico Experimentalsystem) und Simulation (Computorexperiment) nicht unterschieden wird. In der Regel wird vom theoretisch-mathematischen Modell und seiner Anwendung (Simulation) gesprochen. Doch es ist die Transformation vom theoretisch-mathematischen Modell zum Code und danach erst zur numerischen Anwendung, die den epistemischen Kern des Wandels der Wissenschaft im Zeitalter des Computers kennzeichnet. Zu rein mathematischen und experimentellen Bedingungen kommen informatische hinzu. Vor allem um diese informatischen Bedingungen geht es in der vorliegenden philosophischen Verortung, denn die Transformation von Theorie in den Computer – konkreter in maschinenaugliche Algorithmen – kommt einer Medienwende ähnlichen Umfangs gleich wie die Transformation materialer Äquivalente in symbolische Notationen.

„What is a simulation and what is the difference and the relation between a model and a simulation?“, fragt Stephan Hartmann in einem Aufsatz aus der Perspektive der Wissenschaftstheorie. „I maintain that the most significant feature of a simulation is that it allows scientists to imitate one process by another process [...] carried out by a computer“ (Hartmann 1996: 77, 79). Und weiter, nach einem kurzen Überblick über modelltheoretische Ansätze: „More concretely, a simulation results when equations of the underlying dynamic model are solved“ (Hartmann 1996: 83). Die Dynamik respektive Prozesshaftigkeit von Simulationen ist sicherlich das wichtigste Kennzeichen. Mit Computersimulationen überwindet die Wissenschaft statische Modelle aus Holz, Draht oder anderen Materialien. „Scale models“, die zum Studium von Eigenschaften und Verhalten eines Objekts verwendet werden, wie Flugzeugmodelle im Windkanal, können nun im Digitalen untersucht werden. Aber es sind vor allem die theoretischen Modelle, die zuvor nur in einfachster Weise auf dem Papier skizzierbar oder als Gedankenexperiment vorstellbar waren, die sich jetzt mit Computern analysieren lassen.¹⁹ Dies

19 Eine treffende Beschreibung dieser Transformation vom Papier in den Computer gibt ein Biologe in einem der Interviews: „Dann haben wir uns die Kinetik überlegt. Was wäre der einfachste, sinnvollste Ansatz für die verschiedenen, auf Papier gezeichneten Pfeile? In der nächsten Phase wird es schon präziser: Welche Moleküle spielen eine Rolle? Nachdem man es aufgeschrieben hat, kann man vereinfacht auf dem Papier abschätzen, was zu erwarten ist, indem man eine Bifurkationsanalyse macht, Matrizen,

eröffnet den Spielraum für Untersuchungen, die in realiter nicht möglich wären. Der Computer verlängert, ähnlich den Beobachtungs- und Messinstrumenten, den Blick in bislang unzugängliche Bereiche, die zu klein, zu groß, zu schnell, zu langsam, zu gefährlich oder eben zu komplex sind. Doch der Computer führt weiter: Im Unterschied zu den Beobachtungs- und Messinstrumenten erweitert er nicht nur den Blick in neue Bereiche, sondern ermöglicht die experimentelle Manipulation in diesen Bereichen, aber eben nur in rein symbolischer Form. Paul Humphreys untersucht diesen Aspekt in seinem Buch *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Methods*. Er schreibt: „What rarely happens is an analogue of the third type of empirical extension, augmentation, giving us instrumental access to new forms of mathematics that are beyond the reach of traditional mathematics. Here the question naturally arises: Could instrumentally enhanced mathematics allow an investigation of new areas of mathematics to which our only mode of access is the instrument itself?“ (Humphreys 2004: 5).²⁰ Dieser Erweiterungsgedanke, der bereits seit den Debatten der frühen Neuzeit über die Zulässigkeit von Beobachtungsinstrumenten für die wissenschaftliche Erkenntnis diskutiert wird, charakterisiert das Neue der Simulation, das

Stabilitätsanalysen. Dazu braucht man noch keinen Computer. Schließlich kann man das Modell im Computer implementieren. Und wir haben die Bifurkationen, die wir vorhergesagt haben, auch tatsächlich gefunden. [...] Das Modell ist jedoch noch ohne Rückkopplungsschleifen, also ein reduzierter Ansatz. Wenn man Rückkopplungsschleifen integriert, braucht man unbedingt die Computer, dann ist es nicht mehr auf dem Papier zu machen.“ (Interview B, 2004).

- 20 In dem Versuch diese Erweiterungsfunktion zu fassen, führt Humphreys ‚theoretical‘ und ‚computational templates‘ ein. Erstere sind allgemeine Gleichungen wie Newtons zweites Axiom, letztere die berechenbaren Gleichungen, die allerdings nicht immer auf Gesetzen basieren müssen. „The first thing to note about Newton’s Second ‚Law‘ is that it is only a schema, what I shall call a theoretical template. It describes a very general constraint on the relationship between any force, mass, and acceleration, but to use it in any given case, we need to specify a particular force function, such as a gravitational force, an electrostatic force, a magnetic force, or some other variety of force. If the resulting, more specific, equation form is computationally tractable, then we have arrived at a computational template“ (Humphreys 2004: 61). Üblicherweise werden diese ‚computational templates‘ in der Literatur als mathematisches Modell bezeichnet, das die allgemeinen Gleichungen konkretisiert und ausführbar macht. Von daher ist auch Humphreys Definition einer Simulation nicht überraschend: „A computer simulation is any computer-implemented method for exploring the properties of mathematical models where analytic methods are unavailable“ (Humphreys 1991: 501). Auch wenn von manchen Autoren diese Definition als zu eng empfunden wird, so trifft sie den Kern der Simulationen, die auf Differenzialgleichungen basieren.

es epistemologisch zu fassen gilt. Die Schlussfolgerung von Humphreys, „the fact that extending ourselves, scientific epistemology is no longer human epistemology“ (Humphreys 2004: 8), scheint angesichts von über vierhundert Jahren instrumentenbasierter Wissenschaft mit Vorsicht zu genießen sein. Diese Instrumente wie auch der Computer sind menschlichen Ursprungs, insofern unterliegen sie, ebenso wie die damit produzierten Einblicke, den von Menschen konzipierten Bedingungen. In eben diesen Erweiterungsleistungen hat sich Zivilisation im Unterschied zu einem, wie auch immer gearteten Urzustand schon immer definiert.²¹ Genau in diese Erweiterung – nicht nur der Sinneswahrnehmung, sondern nun auch der auf Mathematik basierten Anschauung in neue Bereiche – ist es, die die Wissenschaftsphilosophie an der Computersimulation fasziniert, ohne von einer ‚non-human epistemology‘ sprechen zu müssen. Im Gegenteil, es handelt sich durch und durch um eine menschliche, da fabrizierte Epistemologie. Doch was bedeutet es nun, die mathematikbasierte Anschauung durch die Computer zu erweitern? Leider beschreibt Humphreys nur, dass der Computer, ähnlich dem Mikroskop, unsere Berechnungsmöglichkeiten erweitert, indem beispielsweise komplexere Modelle in höherer Auflösung berechnet werden können.²² Was dies konkret bedeutet, wird nicht weiter thematisiert. Und genau hier liegt das Problem der Analyse von Simulation. Es lassen sich gewisse Kennzeichnungen der Simulation durch Methodenvergleiche, Fallbeispiele und Abgrenzungen zu bereits bestehenden wissenschaftsphilosophischen Theorien herausarbeiten. Doch es ist wesentlich schwieriger, den Erkenntniswert, die epistemische Neuheit und die Folgen für die wissenschaftliche Erfahrung und damit das wissenschaftliche Weltbild

21 Solche ‚human enhancement‘ Diskussionen, die aktuell im Kontext der Converging Technologies wieder verstärkt diskutiert werden, sind mit Vorsicht zu genießen, da hier oft nostalgische, auf einen natürlichen Zustand recurrierende und transhumanistische Positionen in eigenartiger Manier aufeinandertreffen (vgl. Coenen 2008).

22 „I have argued that computational devices are the numerical analogues of empirical instruments: They extend our limited computational powers in ways that are similar to the ways in which empirical instruments extend our limited observational powers“ (Humphreys 2004: 116). „As with microscopes, a desirable property of computer simulations is resolving power – the greater the degree of resolution, the more detail the simulation provides. [...] Because of the quantity of data available, by using graphical representations for the solutions one often can literally see more detail with increased computational power“ (Humphreys 2004: 118). Was wird nun erweitert dadurch? „We can thus see, through the vehicle of the microscopic metaphor, how progress of theoretical science is dependent upon technological extensions of our mathematical abilities. The realm of the [computationally] tractable, like the realm of the observable, is an expanding universe“ (Humphreys 2004: 121).

zu fassen.²³ Das kommt nicht von ungefähr, denn zum einen sind Simulationen relativ neue Erkenntnisinstrumente und zum anderen ist ihre Vielfalt ebenso groß wie die der Modelle.²⁴ Letztendlich entscheidet in der Forschungspraxis der Zweck darüber, welche Art von Simulation wie genutzt wird.²⁵ Dies macht deutlich, dass Simulationen in erster Linie praktische Werkzeuge sind. „Whereas theories, like local claims, can be true or false, models and simulations are typically seen in more pragmatic terms, being more or less useful, rather than more or less true. Scientific models and simulations are given the status of tools, as well as representations; they are objects, as well as ideas. They easily cross categories, such as ‚theory‘ and ‚experiment‘, the bounds of which are otherwise well-established. And modeling and simulation sit uncomfortably in science both socially and epistemically, because of the boundaries they cross“ (Sismondo 1999: 247).

Es sind diese Grenzüberschreitungen, die es so schwierig machen, Simulationen epistemologisch zu bestimmen. Sie liegen als Hybride „somewhere intermediate between traditional theoretical [...] science and its empirical methods of experimentation and observation“ (Rohrlich 1991: 507). Fast poetisch artikuliert es Peter Galison in seiner Studie zur Entwicklung der Monte-Carlo-Simulation in den 1940er Jahren in Los Alamos. Simulation „ushered physics into a place paradoxically

-
- 23 Ebenso vielfältig wie die Modelle und Simulationen sind daher die Versuche, beides epistemologisch zu bestimmen. Es überrascht nicht, dass die wissenschaftstheoretischen und -philosophischen Verortungen dabei stark von den jeweiligen Fallbeispielen abhängen, die sich üblicherweise auf physikalische Beispiele, manchmal auch auf ökonomische, meteorologische oder biologische und chemische, seltener auf Beispiele aus der Technik, der Medizin oder anderen Disziplinen beziehen. Von daher sind Aussagen nur im jeweiligen Kontext der untersuchten Fallbeispiele zu bewerten, wie dies auch für die vorliegende Studie gilt. In anderen Kontexten mag die Situation des Simulierens sowie der Einbettung in Theorie, Modell, Experiment, Beobachtung und Messung eine andere sein.
- 24 Einen Überblick in punkto Modellvielfalt bietet der Einführungsartikel zum Thema *Models in Science* der Stanford Encyclopedia of Philosophy (Stanford Encyclopedia of Philosophy 2006).
- 25 So unterscheiden beispielsweise Friedemann Mattern und Horst Mehl kontinuierliche und diskrete Simulationen. Diskrete Simulationen differenzieren sie je nach Zweck und Perspektive weiter in ereignisgesteuerte (beispielsweise Verkehrssimulationen), zeitgesteuerte (beispielsweise Game of Life), aktivitätsgesteuerte, prozessgesteuerte und transaktionsorientierte (beispielsweise Ablaufsteuerung in Fabriken) Simulationen (vgl. Mattern, Mehl 1989). Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden verschiedene Simulationsverfahren entwickelt wie beispielsweise die Differenzenmethode, die Finite Elemente Methode sowie Zelluläre Automaten, und Methoden wie adaptive Gitteranpassung oder genetete Modelle.

dislocated from the traditional reality that borrowed both the experimental and theoretical domains, bound these borrowings together, and used the resulting bricolage to create a marginalized netherland that was once nowhere and everywhere on the usual methodological map. In the process of negotiation the relationship of Monte Carlo to traditional categories of experiment and theory, the simulators both altered and helped define what it meant to be an experimenter or theorist in the decades following World War II“ (Galison 1996: 120). Diesen neuen Status der simulierenden Forscher hat Deborah Dowling in einer Interviewstudie hinterfragt. „The authority of scientific simulation relies on an analytical knowledge of the underlying ‚theoretical‘ mathematics, while the pragmatic utility of simulation relies on the scientist’s ability to black-box the program, to delegate the computations to the machine and to interact ‚experimentally‘ with the surface“ (Dowling 1999: 271; vgl. Dowling 1998). Die Unterscheidung zwischen mathematischer Grundlage und experimenteller Oberfläche, die auf Sherry Turkles Untersuchungen zu Human-Computer-Interaktionen zurückgeht (vgl. Turkle 1995), legt einen „playing around [Modus und ...] creative experimentation with a mathematical model“ nahe (Dowling 1991: 271). Nicht von ungefähr lautet der Titel von Dowlings Artikel *Experimenting on theories*. In ähnlicher Weise sprechen Günter Küppers und Johannes Lenhard von *Computersimulationen: Modellierungen 2. Ordnung* und meinen damit, dass „Computersimulationen als ein Experimentieren mit Theorien zu begreifen“ sind (Küppers, Lenhard 2005: 326).²⁶ Dieses Experimentieren wird von Evelyn Fox Keller weiter unterschieden als ‚experiments in theory‘ und ‚computer experiments‘ (vgl. Fox Keller 2003).

Die experimentelle Verwendung von Simulationen lässt sich in vielfältiger Weise in der Wissenschaft finden. Daher ist es wichtig, Computersimulationen und ihre „complex chain of inferences that serve to transform theoretical structures into specific concrete knowledge [...] that has its own unique epistemology“ (Winsberg 1999: 275) genau zu untersuchen. Diese Epistemologie, so Eric Winsberg, der sich an Allen Franklins Frage orientiert ‚How do we come to believe rationally in an experimental result?‘ (vgl. Franklin 1986), generiert sich aus den verschiedenen Komponenten einer Simulation.

„A calculational structure of theory; techniques of mathematical transformation; a choice of parameters, initial conditions, and boundary conditions; re-

26 Das Konzept der Modellierung zweiter Ordnung bezieht sich bei Küppers und Lenhard darauf, dass Simulation „die modellierte Dynamik imitiert und nicht etwa numerisch eine Lösung berechnet“ (Küppers, Lenhard 2006: 324).

duction of degrees of freedom; ad hoc models; a computer and computer algorithm; a graphics system; and an interpretation of numerical and graphical output coupled with an assessment of their reliability. A thorough epistemology of simulation requires a detailed analysis of the role of each of these components and an analysis of how a skilled simulationist can manage each potential contribution as a source of error. Here, I will have to be satisfied to note a few crucial features of the process of scrutiny“ (Winsberg 1999: 289).²⁷

Die Schlussfolgerung, welche Winsberg aus seiner Analyse zieht, ist, dass das Vertrauen in Simulationen nicht unbedingt auf deren theoretischer Fundierung resultiert, sondern dass „the epistemology of simulation [...] is very much an empirical epistemology, and not merely a mathematical-logical one [...] our theoretical knowledge is just one of several ingredients that simulationists use to produce their end product – a model of the phenomena“ (Winsberg 1999: 290, 291). Winsberg entschuldigt sich für diese unbefriedigende Konklusion mit dem Hinweis: „Unfortunately, this conclusion is simply the result of a fundamental limitation of our cognitive power. When it comes to complex systems, we simply cannot bend our theories to our cognitive will – they will not yield results with any mechanical turn of a crank“ (Winsberg 1999: 291). Ob dies aber bedeutet, dass sich das Verstehen nur auf der Oberfläche der Bildschirme, also an den simulierten Phänomenen abspielt, gilt es zu hinterfragen. Denn in der Forschungspraxis ist es in der Regel nicht so, dass erst ein Simulationsmodell programmiert und damit dann experimentiert wird oder dass eine Modellhierarchie durchlaufen wird, an deren Ende die Simulation als Experiment steht. Modellierung, Programmierung und Simulation – zu Test- wie experimentellen Zwecken – sind miteinander rückgekoppelt und die Modellierer gehen in diesem Arbeitsprozess immer wieder zurück zur Theorie, zum mathematischen Modell und zum Code, nehmen Veränderungen vor, um dann erneut Simulationsläufe zu starten. Das vorläufige Ende – als ‚release‘ einer Modellversion bezeichnet – geschieht meist willkürlich aus Zeitgründen, etwa in der Klimamodellierung, um zugesagte IPCC Szenarien zu rechnen oder ein Modell der Community zur Verfügung zu stellen. Doch schon am nächsten Tag wird das in-silico Experimentalsystem

27 In einem anderen Aufsatz spricht Winsberg von einer Modellhierarchie: Die Theorie wird durch das ‚mechanische‘, also theoretische Modell spezifiziert (Anfangs- und Randbedingungen, Parametrisierungen), in ein dynamisches Modell transformiert (ad-hoc Modellierungen, Annahmen, Approximationen, etc.) und schließlich diskretisiert und codiert in ein ‚computational model‘ überführt, das dann berechnet wird. Die Resultate werden visuell aufbereitet, analysiert sowie interpretiert und ergeben schließlich das ‚model of the phenomena‘ (vgl. Winsberg 1999a).

weiter verändert, eine neue Version generiert und neue Simulationen durchgeführt. Diese Rückkopplungen und (Re-)Konfigurationen auf allen Ebenen charakterisieren das Forschen mit Computerexperimenten.²⁸ Ein Großteil des Erkenntnisgewinns resultiert gerade aus diesen permanenten Verbesserungen und Tests, also durch das Einrichten, Justieren und Verändern des in-silico Experimentalsystems, und nicht nur aus dem Experimentieren mit dem fertigen Konstrukt. Der epistemisch wohl fruchtbarste Prozess ist vielleicht sogar die Fehlersuche im Modell wie das Beispiel der Vulkanparametrisierung illustrierte. Für viele Wissenschaftsbereiche spielen diese immer wieder hergestellten Rückkopplungen zu Teilen der zugrundeliegenden Theorie, des Codes, aber auch zu den empirischen Quellen während des Konstruktionsprozesses die wichtigste Rolle für den Erkenntnisgewinn. Daher wäre es wichtig, diese von Winsberg angesprochene „complex chain of inferences that serve to transform theoretical structures into specific concrete knowledge“ (Winsberg 1999: 275) an konkreten Fallbeispielen in ihren verwickelten Zusammenhängen im Laufe der Arbeitsprozesse zu untersuchen.

Dabei würde es allerdings weniger um die Frage gehen, „whether or not, to what extent, and under which conditions, a simulation reliably mimics the physical system of interest“ (Winsberg 2003: 115), als mehr um die methodologischen wie epistemischen Transformationen, die innerhalb dieser Kette an Folgerungen stattfinden. Wissen wird während des Modellierens, Codierens und Simulierens von einem Modus in einen anderen transformiert und stellt damit einen sehr komplexen Prozess der Erkenntnisgewinnung dar. Genau diese Transformationen sind für den Entdeckungszusammenhang simulationsbasierter Erkenntnisse charakteristisch und kennzeichnen den Unterschied zu anderen Formen wissenschaftlicher Erkenntnisgenerierung. Sich allein auf das fertige Konstrukt oder den Begründungszusammenhang zu fixieren, ist dabei wenig hilfreich. Denn was häufig ignoriert wird, ist, dass Simulationsmodelle weit mehr als computerberechenbare Umsetzungen von basalen Gleichungen respektive Modellierungen zweiter Ordnung sind. Die hauptsächliche Arbeit steckt in der Programmierung der zusätzlichen Parametrisierungen, nicht nur in der Diskretisierung der zugrundeliegenden Gleichungen und den dafür nötigen Randbedingungen. Meist geht dies auch mit einer interdisziplinären Ausweitung der Simulationsmodelle einher,

28 Natürlich spielt hier auch wieder das gewählte Fallbeispiel eine Rolle. Vielleicht lässt sich ein Durchlauf durch eine Modellhierarchie bis zum Simulationslauf in manchen Wissenschaftsdomänen und vor allem für einfache Modelle finden. Doch im Falle der Klimamodellierung, aber auch der Biologie und der Gravitationsphysik ist das in realiter sicherlich nicht der Fall.

denn oft wird Information aus weiteren Wissenschaftsdisziplinen benötigt. Dies hängt natürlich vom Ziel der Simulation ab. Computerlaborstudien, wie die von Martina Merz zu Simulationen in der Elementarteilchenphysik, von Erika Mattila zu Epidemiesimulationen oder von Mikaela Sundberg zur Klimaforschung, wissen um die Bedeutung dieses Restes jenseits der basalen Gleichungen (vgl. Merz 1999, 2002; Mattila 2006; Sundberg 2005). Sie decken die verwickelten, epistemischen Prozesse des Modellierens und Simulierens auf. Mattila beispielsweise beschreibt die Einsicht, die sie aus ihrer empirischen Studie gewonnen hat, wie folgt:

„The empirical analysis conducted in this study supplies an account of the multiple functions of models within their life span: there was a change during the modeling process from *research objects* to *tool*, depending on the corresponding uses and applications. As tools they were material for other models, and they also nurtured the skills of the modellers to expand their research to other fields. [...] The modellers stressed that the models functioned as ‚media‘ for communication. The starting point was the need to find ways of organizing and managing interdisciplinary research work in order to build infectious-disease models. Although regular collaborative means, such as joint seminars and literature reviews were also used, the models played a special role in facilitating the communication: the difficult technical details, the mathematical formalisms, and the specificities of the infection were communicated *in them*“ (Mattila 2006: 187, 188). „Did the models fulfill any experimental functions (i.e. were bound up with experimental practice)? They were used in predicting possible scenarios by answering ‚what-happens-if‘ types of questions, which could be considered to carry their experimental function“ (Mattila 2006: 189).

In der Forschungspraxis stellt sich das Verhältnis zwischen Simulationsmodellen und Modellierern als ein komplexes dar, in welchem den Modellen allerlei unterschiedliche Funktionen zukommen. Das Experimentieren ist dabei nur eine unter vielen Funktionen, und steht dabei meist unter der prognostischen ‚was-wäre-wenn‘-Fragestellung. Merz fasst diese verschiedenen Funktionen einer Simulation unter dem Begriff ‚Multiplexität‘ zusammen (vgl. Merz 1999). Mit Lorenzo Magnani, der sich dabei allerdings nicht auf Simulationsmodelle, sondern auf klassische Modelle bezieht, könnte man Simulationen aufgrund ihrer vielfältigen Funktionen als ‚epistemic mediators‘ bezeichnen (vgl. Magnani 2001). Sundberg meint Ähnliches, wenn sie von einer ‚line of work‘ spricht: „The practices more literally constitute a line of work, ranging from theoretical construction, explorative use, pragmatic construction, to applied use. However, it is the simulation model, rather than collaborative projects, that brings the working practices in modeling together as a

collective (subworld)“ (Sundberg 2005: 159). Diese vielfältigen Funktionen der Computereperimente gestalten Forschungspraxis um, die einer neuen Syntax folgt, wie sie Matthias Heymann in seiner historischen Studie zu atmosphärenchemischen Simulationen rekonstruiert hat. „The use of computer as a tool required a change of practices towards a drastic simplification, the collection and preparation of an enormous amount of input data, the adoption of control procedures to validate the models, and the execution of ‚computer experiments‘ in sensitivity studies. The range and order of practices, which evolved in atmospheric modeling, may be regarded as what Rohrlich called ‚new syntax‘ of scientific practices or as a specific new form of knowledge production“ (Heymann 2006: 78). „It produces ‚computer observations‘, which make a new entry into the heterogeneous set of elements of knowledge“ (Heymann 2006: 84). Diese ‚computer observations‘ generieren zunehmend einen neuen Raum quasi-empirischer Analysen.

Doch was bedeutet es für den einzelnen Wissenschaftler im Alltag, wenn Computer eine neue Form der Arbeitsteilung einführen, nämlich die zwischen Forschern und Computern? „Das Gelingen von Kooperation zwischen Objekt und Subjekt setzt auf Seiten der Wissenschaftler Fertigkeiten, Erfahrungen und Kooperationsbereitschaft voraus“ (Merz 2002: 271), schreibt Martina Merz in ihrem Artikel *Kontrolle – Widerstand – Ermächtigung: Wie Simulationssoftware Physiker konfiguriert*, der das Wechselverhältnis zwischen Modellierern und ihren Modellen untersucht. „Auf dieser Grundlage ist eine Arbeitsteilung zwischen Objekt und Subjekt möglich: Wissenschaftler bereiten die Simulationssoftware vor und setzen Anfangsbedingungen. Sie übergeben darauf die Initiative an das Computerprogramm, das nun seine Daten eigenständig produziert. Während das Programm läuft, entzieht es sich dem Zugriff von außen. [...] Im Anschluss an den Prozess der Datenproduktion ergreifen wiederum die Wissenschaftler die Initiative, indem sie den Softwareoutput verarbeiten und interpretieren“ (Merz 2002: 271). Die Wechselwirkungen zwischen Modellierern und ihren Modellen werden von beiden Seiten gesteuert, wobei die Modelle als komplexe beziehungsweise multiplexe Objekte die Zugriffsformen regulieren. „Insbesondere jene Bestandteile [der Simulationssoftware], die den identitätsstiftenden konzeptionellen Kern des Programms stützen und ausmachen, sind für die große Mehrheit der Anwender unzugänglich, während relativ eigenständige Programmkomponenten von Anwendern nach Bedarf

an- und ausgeschaltet werden können“ (Merz 2002: 275, 276).²⁹ Aus dieser Reglementierung ergeben sich Gebrauchsanweisungen im Umgang mit der Simulation. Kontrollentzug und Widerstand gegenüber den geplanten Simulationsexperimenten sind die Folge. Dabei erscheint das Objekt den Forschern, so Merz, aus zwei Gründen widerständig. „Zum einen geben simulierte Daten den Grad ihrer Zuverlässigkeit nicht ohne weiteres preis; zum anderen sind die potenziellen Ursachen für unerwartete Ereignisse vielfältig. Das Objekt mutiert quasi unter der Hand von einer Antwortmaschine in eine (die Physiker herausfordernde) Fragemaschine“ (Merz 2002: 280). Ein Physiker, der für die Studie interviewt wurde, bringt es auf den Punkt: „A lot of people really trust the Monte Carlo as a sort of absolute prediction of QCD [Quantenchromodynamik] whereas most people who know a bit more about what happens inside a program distrust it maybe more“ (Merz 2002: 280).³⁰ Doch es lässt sich noch eine weitere Konfiguration feststellen und zwar hinsichtlich des Sozialen des Forschungsalltags, und genau hierin liegt auch ein wichtiger Aspekt für den Erkenntnisgewinn. „Simulation versetzt Physiker in die Lage, den Grenzbereich von Theorie und Experiment als einen Raum der Interaktion, Kooperation, Verhandlung, Manipulation und Entdeckung zu entfalten. Diese Konfiguration des Sozialen beruht auf verschiedenen Modi der Verbindung und Überbrückung“ (Merz 2002: 283, 284). Dabei spielt die Visualisierung der Resultate eine Rolle. Diese entsprechen eher der Vorstellungswelt der Experimentalphysiker und ermöglichen daher theoretischen Physikern einen neuen Zugang zur Theorie. Das Experimentieren mit dem Simulationsmodell leistet Ähnliches. Auf der anderen Seite werden Experimentalphysiker „durch die Simulation befähigt, neues epistemisches Terrain zu betreten und explorieren. Dabei erkunden sie einen Teil des epistemischen Raums theoretischer Physiker. [...] Simulation verkoppelt und erweitert epistemische Räume und ermöglicht die Etablierung neuer Formen der Arbeitsteilung und Kooperation zwischen Physikern verschiedener Ausrichtung. [...] Simulation [ermächtigt] Physiker insbesondere auch zu neuen Formen des Forschungshandelns“ (Merz 2002: 285, 286).³¹

29 Das gilt nicht nur für Anwender von Simulationssoftware. Im Falle großer Modelle wie in der Klimaforschung hat ein einzelner Modellierer nur auf einen Teil des Gesamtmodells Zugriff und muss sich mit den anderen Programmteilen arrangieren.

30 Von daher sollten nicht nur Naturwissenschaftler, sondern vor allem Wissenschaftstheoretiker und -philosophen, Simulationen nicht nur als neue experimentelle Antwortmaschinen betrachten, sondern vor allem ihren Wert als Fragemaschinen anerkennen.

31 „Dabei hat Simulation zwei epistemische Funktionen: Zum einen erlaubt sie ein Experimentieren am Computer (in ‚dry lab‘-Experimenten) [...].

Diese neuen Formen des Forschungshandelns, die neue Syntax der Forschungspraxis, beschäftigt auch eine Reihe von Autoren im Kontext ökonomischer Simulationen. Im Unterschied zu den naturwissenschaftlichen Simulationsverortungen kommt hier eine weitere Komponente ins Spiel. „I suggest that the umbrella term ‚simulation‘ [...] was formed from a set of four interlocking elements, namely: ‚experiment‘, ‚model‘, ‚game‘ and ‚the computer‘ (Morgan 2004: 362). Mary Morgan, die in ihrem Artikel *Simulation: The birth of a technology to create 'evidence' in economics* die Entstehung der Simulation in den 1960er Jahren untersucht, zitiert einige der Simulationspioniere, unter anderem Geoffrey P. Clarkson und Herbert A. Simon: „Simulation is a technique for building theories that reproduces part or all of the output of a behaving system [...] The process of simulation involves constructing a theory, or model, of a system that prescribes the system's processes [...] By carrying out the processes postulated in the theory, a hypothetical stream of behavior is generated that can be compared with the stream of behavior of the original system“ (Clarkson, Simon 1960: 920). Dieses Zitat verortet Simulationen nicht nur in den Bereich von Technologien, und diesem Vorschlag folgt Morgan in ihrer Analyse,³² sondern kennzeichnet den wichtigsten Zweck ökonomischer Simulationen, nämlich Verhalten zu simulieren. Es wird aber auch deutlich, dass die benötigte Theorie oder das Modell eines spezifischen ökonomischen Settings parallel zur Simulation entsteht. Im Unterschied zur Physik handelt es sich nicht um einen jahrhundertealten Formelkanon, der nun dank Simulationen numerisch approximiert und somit in neuer Weise analysiert werden kann. Simulationen erschließen den Wirtschaftswissenschaften in den 1960er Jahren, neben realen Rollenspielen, erst die Möglichkeit zu experimentieren und dafür braucht es entsprechende Modelle respektive Theorien.³³ „By tradition, economics was not regarded as an experimental science, a view which had to be overcome“ (Morgan 2004:

Zum anderen unterstützt sie die Erforschung von Analysestrategien und alternativen Modellbeschreibungen und dient damit einer Vertiefung des theoretischen Verständnisses“ (Merz 2002: 270).

- 32 „Labeling simulation a technology gives two advantages. First, as a technology, it presents itself in various forms, with each of the combined elements having more or less importance for any particular version, so we can be less concerned about the specifics of the techniques. Second, it draws attention to the combination of human know-how and material things associated with the meaning of ‚technology‘“ (Morgan 2004: 363).
- 33 „The, now classic, first market experiment in economics was reported by Edward Chamberlin (1948) who described a set of forty-six classroom („laboratory“) experiments“ (Morgan 2002: 46, vgl. Chamberlin 1948).

369). Ähnlich wie in der Biologie stimulieren Simulationen neue Arten von Theorien, von Modellen und von Experimenten.

Daher sollten Simulationen, wie das Margaret Morrison für Modelle fordert, als „autonomous agents“ verstanden werden (vgl. Morgan, Morrison 1999). In ihrem Buch *Models as Mediators* postulieren Morgan und Morrison: „We believe there is a significant connection between the autonomy of models and their ability to function as instruments of investigation. It is precisely because models are partially independent of both theories and the world that they have this autonomous component and so can be used as instruments of exploration in both domains“ (vgl. Morrison, Morgan 1999: 10). In dieser Interpretation wird der Simulation ein wichtiger, aber leider nicht autonomer Stellenwert zugewiesen. Simulation wird hier als eine modellspezifische Form der Repräsentation angesehen, die den autonomen Charakter der Modelle stärkt. „Although simulation and modelling are closely associated it is important to isolate what it is about a model that enables it to ‚represent‘ by producing simulations. This function is, at least in the first instance, due to certain structural features of the model, features that explain and constrain behavior produced in simulations. In the same way that general theoretical principles can constrain the ways in which models are constructed, so too the structure of the models constrains the kinds of behavior that can be simulated“ (vgl. Morrison, Morgan 1999: 29).³⁴

Doch möglicherweise lässt sich der Spieß umdrehen und fragen, ob nicht mittlerweile die Simulation die Struktur der simulierbaren Modelle und Theorien bedingt und damit zu einer neuen Klasse von Modellen und Theorien als auch Experimenten führt.

34 Hier fehlt die Differenzierung zwischen mathematischem Modell, ins-silico Experimentalsystem (algorithmiertem Modell) und experimentellem Setting, also dem konkreten Computerexperiment. Das Verhalten der Simulation wird entscheidend von den Anfangs- und Randbedingungen bestimmt, nicht nur durch die vom Modell vorgegebene Struktur.

2 DENKEN IN MATHEMATISCHEN MÖGLICHKEITSRÄUMEN

In der diskutierten Literatur wird auf verschiedene epistemische und forschungspraktische Kennzeichen von Simulationen hingewiesen. Vor allem die Prozesshaftigkeit von Simulationen und ihre Erweiterungsfunktion mathematischer Erkenntnis sowie die Grenzüberschreitungen zwischen Theorie und Experiment, indem mit Theorie experimentell umgegangen wird, werden thematisiert.¹ Dennoch ist es schwierig, den Erkenntniswert, die epistemische Neuheit sowie die Folgen für die wissenschaftliche Erfahrung und das damit verbundene wissenschaftliche Weltbild zu erfassen. Unter Umständen liegt dies daran, dass Simulationen aus der falschen Blickrichtung untersucht werden. Der Blick richtet sich dabei ausgehend von den traditionellen Verfahren – Theorie, Modell, Messung, Beobachtung – auf die Simulation. Vielleicht ist dies der Grund, dass der Computer im Kontext der Computersimulationen so augenfällig marginalisiert, dass die Simulation allzu bereitwillig dem Modell untergeordnet und dass versucht wird, die grenzüberschreitende Funktion von Simulationen klassisch zu fassen. Ein Wechsel der Blickrichtung ist dringend erforderlich, damit Simulationen aus der Perspektive des Computers als notwendiger Bedingung computerbasierter Wissenschaft hinterfragt werden können.

1 Vielleicht könnte man noch hinzufügen, dass Simulationen datenbasierte Schnittstellen zwischen Theorie und Experiment respektive Messung sind (vgl. Gramelsberger 2004: 48ff), dass sie Bilder von Theorien generieren (vgl. Gramelsberger 2001: 148ff) und dass sie semiotisch gesehen Technologien des Überschreibens sind (vgl. Gramelsberger 2001, 2004a).

Ein solcher Perspektivwechsel soll nun vorgenommen werden. Das Ziel ist es dabei, den epistemischen Kern des Wandels der Wissenschaft im Zeitalter des Computers zu erfassen, diesen Kern als Medienwende in der Mathematik zu beschreiben, die den mathematischen Anschauungs- und Handlungsraum erweitert, und Simulationen respektive Computerexperimente dabei als neue symbolische Form von Forschung in Anlehnung an Ernst Cassirers *Philosophie der Symbolischen Formen* zu verstehen (vgl. Cassirer 1923, 1929). Vor dem Hintergrund des Wechsels der Blickrichtung ergeben sich drei Fragen: Nach der Rolle des Computers, nach dem Verhältnis von mathematischem Modell und Simulation und schließlich nach dem Status der klassischen erkenntnisgenerierenden Verfahren im Zeitalter des Computers.

Extreme Welten I

Der Computer wird als Instrument angesehen, das theoretische Modelle in dynamische wandelt, das dank seiner unglaublichen Schnelligkeit die numerischen Möglichkeiten erhöht und das aus diesem quantitativen Vorteil einen qualitativen generiert. Qualitativ, indem mit theoretischen Modellen durch Visualisierung auf Phänomenebene, im Sinne eines Beobachtens des simulierten Systemverhaltens, gearbeitet werden kann. Vor allem hierin wird die Erweiterungsfunktion des Computers gesehen, ähnlich dem Mikroskop. Er gibt neue Einblicke in neue Welten.² Doch auch wenn der Computer in seiner Erweiterungsfunktion hoch geschätzt wird, noch fehlt eine konkrete Analyse dieses „third type of empirical extension“ (Humphreys 2004: 5), die den Computers als das ermöglichende Medium berücksichtigt. Denn die grundlegende Bedingung dieser neuen Wahrnehmungsform ist die Algorithmierung der theoretischen Modelle, also die Codierung von Theorie. Eine Analyse des Codes oder der Praktiken des wissenschaftlichen Programmierens findet man jedoch in keinem der Beiträge über Computersimulationen.³ Dies kann nur be-

-
- 2 Dieser „third type of empirical extension“ (Humphreys 2004: 5) ist es, der Wissenschaftsphilosophen inspiriert, Empiristen hingegen herausfordert. Denn der Computer wird als Weltengenerator wahrgenommen, aber als einer, der lediglich virtuelle Welten generiert – im Unterschied zu Mess- und Experimentierinstrumenten. Daher widmet Paul Humphreys einen Großteil seines Buches dem wissenschaftlichen Empirismus in seiner instrumentenvermittelten Form, um diese Einschätzung zu relativieren.
 - 3 Einige konkrete Hinweise zur wissenschaftlichen Programmierung lassen sich bei Martina Merz und Mikaela Sundberg finden und in sehr allgemeiner Beschreibung bei Eric Winsberg (vgl. Merz 1999, 2002; Sundberg 2005; Winsberg 1999, 1999a).

deuten, dass entweder davon ausgegangen wird, dass das mathematische Modell sich ohne größere Probleme in ein Programm übersetzen lässt. Oder dass der Computer nur als eine theoretische Größe im Sinne der Ermöglichung der Berechenbarkeit verstanden wird und es daher zulässig erscheint, nur sehr allgemein über bestimmte Eigenschaften zu sprechen. Doch beide Marginalisierungen sind nicht zutreffend, und dies soll anhand des Antagonismus zwischen der epistemischen Komplexität wissenschaftlicher Forschung und der jeweils unterschiedlich gelagerten Extremalität mathematischer wie programmierter Modelle näher untersucht werden.

Die Grundvoraussetzung für Simulationen, so wird es einhellig gesehen, sind die mathematischen Modelle. Dies gilt es weder theoretisch noch forschungspraktisch in Zweifel zu ziehen, doch mathematische Modelle sind extreme Gebilde, die einer anderen Logik folgen als die programmierten Modelle, und dies nicht nur aus Gründen der Numerik oder der effizienten Berechenbarkeit. Dieser Unterschied wird deutlich, wenn man die Praktiken der mathematischen Modellierung mit denen der wissenschaftlichen Programmierung vergleicht. In dem schon etwas älteren, aber in seiner Konzeption einzigartigen Buch, *Angewandte Mathematik. Gegenstand, Logik, Besonderheiten* von 1976 (deutsche Übersetzung von 1984), analysieren die Mathematiker Ilja Blechmann, Anatolij D. Myskis und Jakow G. Panovko die Vorgehensweise der Modellierung in der angewandten Mathematik, zumeist an Beispielen aus der Physik.⁴

„Die spekulativen [theoretischen] physikalischen Modelle simulieren das reale Objekt mit Hilfe abstrakter Darstellungen in physikalischer Sprache, und das nicht selten unter breiter Nutzung der Sprachen und der Mittel der Mathematik. Sie liefern eine mehr oder weniger vereinfachte Beschreibung des Objekts. [...] Zum Beispiel werden in der Mechanik bei der spekulativen Modellbildung solche Begriffe wie Massenpunkte, absolut starre Körper, elastisches oder plastisches Medium, zähe Flüssigkeit u.a. verwendet. Diese Abstraktionen erlangten die Bedeutung von fundamentalen Modellen in der Mechanik. Bei der Modellierung von Aufgabenstellungen verwendet man Vorstellungen der absolut glatten oder der absolut unebenen Fläche, der Unbegrenztheit des betrachteten Objekts [...] oder zweckmäßige Vereinfachungen kinematischer Art (zum Beispiel: die Flüssigkeitsströmung in einem Rohr ist eindimensional; die Querschnitte eines Balkens bleiben bei der Biegung eben)“ (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 145, 146).

4 Es geht den Autoren um eine Grundlegung des rationalen Schließens in der angewandten Mathematik in Abgrenzung zum deduktiven Schließen der reinen Mathematik. Dabei entspricht der Begriff des rationalen Schließens George Polyas Begriff des plausiblen Schließens (vgl. Polya 1954).

Diese Idealisierungen der Physiker kreieren bereits im Hinblick auf ihre Mathematisierung extreme Welten, welche sich in mathematischen Verfahren, beispielsweise der Bestimmung von Minima und Maxima einer Funktion, in der Periodisierung von Bewegungen oder in der Linearisierung von Beziehungen zweier Größen fortsetzen. Diese Idealisierungen im physikalischen und später im mathematischen Modell dokumentieren die begrenzten Darstellungsmöglichkeiten der Mathematik als Modellierungssprache, deren Elemente „eine geometrische Form, eine Funktion, ein Vektor, eine Matrix, eine skalare Größe oder sogar eine konkrete Zahl“ sind (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 146). Es wird zwar von den Autoren behauptet, dass das physikalische Modell mehr oder weniger die Struktur des mathematischen vorgibt. Doch dabei wird übersehen, dass dies vor einem sich seit Jahrhunderten vollziehenden Co-Evolutionsprozess stattfindet, der Naturlehre in mathematische Physik transformierte. Physikalisch zu denken und zu modellieren bedeutet automatisch, sich in der Sprache der Mathematik zu bewegen und die Phänomene und Objekte aus der Perspektive der Grammatik dieser Sprache zu sehen.⁵ Was sich dabei mathematisch nicht fassen lässt, entzieht sich (zumindest fürs Erste) der Untersuchbarkeit und Beschreibbarkeit, solange nicht eine neue mathematische Darstellungsform gefunden ist. Die Geschichte des Differentialkalküls, wie von Herman H. Goldstine eindrucksvoll rekonstruiert, ist ein gutes Beispiel dafür (vgl. Goldstine 1977, 1980). Ein vielleicht noch besseres Beispiel ist die Relativitätstheorie. Provokant schreibt Albert Einstein 1938: „Es gibt keine induktive Methode, welche zu den Grundbegriffen der Physik führen kann. Die Verkenntung dieser Tatsache war der Grundirrtum so mancher Forscher des 19. Jahrhunderts“ (Einstein 1938: 1). Auch wenn Einsteins Behauptung aus epistemologischen Gründen hinterfragt werden kann, so macht sie doch deutlich, dass hier auf der selbstverständlichen Grundlage der Mathematisierung der Physik argumentiert wird. Das ist kein Zufall, denn wie Einstein selbst berichtet, war es die Vereinheitlichung von mathematisch formulierten Inertialsystemen, die letztendlich dazu führte, dass „die Zeit ihren absoluten Charakter [verlor] und [...] den ‚räumlichen‘ Koordinaten als algebraisch (nahezu) gleichartige Bestimmungsgröße zugeordnet“ wurde (Einstein 1938: 2).

Die Grammatik der mathematischen Sprache hat die Naturwissenschaft voll im Griff und produziert extreme Welten, die unter dem Be-

5 Ein weiteres Motiv der Idealisierung und Abstraktion ist sicherlich die von René Descartes geforderte Einfachheit als Voraussetzung der Analyse von Phänomenen (vgl. Descartes 1637).

griff der mathematischen Modelle gehandelt werden.⁶ Losgelöst vom extrasymbolischen Kontext einer Physik, einer Chemie oder einer Meteorologie, lassen sich weitere Idealisierungen vornehmen, die der einfacheren mathematischen Zugänglichkeit der Modelle verpflichtet sind. „Manchmal können in den Gleichungen das eine Glied beibehalten und das andere vernachlässigt werden; nichtlineare Abhängigkeiten können linearisiert, komplizierte geometrische Formen durch einfachere ersetzt werden usw.“ (Blechnann, Myskis, Panovko 1984: 148). Allerdings sind die Folgen eines ‚un-sachgemäßen‘ Umgangs mit den mathematischen Modellen nicht nur anwendungsferne Idealisierungen wie in Eulers Bewegungsgleichung, sondern es können auch „gewisse ‚Monster‘ auftreten, d.h. *parasitäre* Ergebnisse mit dem Charakter von rein logischen Folgerungen, die keine reale Interpretation zulassen“ (Blechnann, Myskis, Panovko 1984: 65).⁷ Auch wenn sich zahlreiche unsachgemäße Fälle mathematischer Modellierung finden lassen, so ist die Adäquatheit des Modells in Hinblick auf das zu untersuchende Objekt oder Phänomen erste Priorität. Da es keine allgemeine Methode zur Überprüfung der Adäquatheit eines Modells gibt, behilft man sich mit verschiedenen mathematischen Strategien. Blechnann, Myskis und Panovko sprechen von „Regeln der begleitenden Selbstkontrolle“ des mathematischen Modells. Dazu gehören die Kontrollen der Dimensionen, der Größenordnungen, des Charakters der Abhängigkeiten, des Definitionsgebiets der Randbedingungen, der mathematischen Abgeschlossenheit und extremer Situationen. Bei einer sorgfältigen Analyse bestätigt sich nicht nur die Adäquatheit, sondern es zeigt sich auch, dass das Modell Nebenadäquatheit aufweisen kann. Das bedeutet, „es ermöglicht eine richtige

-
- 6 Von der Semantik der mathematischen Sprache zu sprechen würde falsche Vorstellungen wecken, denn diese Semantik taugt lediglich zur Konkretisierung von Kalkülsystemen anhand erzeugter Zeichenfolgen. Der Gewinn der ersten Medienwende der Mathematik vom Material zum Zeichen führte im 16. und 17. Jahrhundert zur Loslösung von extrasymbolischen Bezügen, die üblicherweise als Semantik eines natürlich-sprachlichen Zeichensystems bezeichnet werden. Die Semantik eines künstlichen Zeichensystems wie das der Mathematik wird hingegen rein intrasymbolisch geregelt. Durch diese Formalisierung, die Voraussetzung der Kalkülisierung ist, ist überhaupt die Mechanisierung der Mathematik in Form berechenbarer Funktionen denkbar (vgl. Krämer 1991, Gramelsberger 2001, 2005a).
- 7 Ein solches ‚Monster‘ wurde bereits erwähnt, nämlich dass, basierend auf Hermann von Helmholtz’ Postulat von 1858, in idealisierten Fluiden Wirbel existieren können, die aber weder vergehen noch entstehen können. Dies führte zu eigenartigen Schlussfolgerungen wie etwa der: Wirbel seien in universalen Fluiden wie dem Äther „as permanent as the solid hard atoms assumed by Lucretius“, [as] Kelvin wrote to Helmholtz in a letter in 1867” (Eckert 2006: 20).

qualitative und quantitative Beschreibung nicht nur der Charakteristiken, für die es gebildet wurde, sondern auch noch einer Reihe anderer unabhängiger Nebencharakteristiken, deren Untersuchung sich erst im weiteren als notwendig erweisen kann“ (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 155).⁸

Diese kurze und sicherlich bezüglich der Adäquatheitsprüfung unbefriedigende Darstellung – beispielsweise können im Laufe der Modellierung unberücksichtigte Faktoren eine große Rolle spielen – zeigt, dass mathematische Modelle idealisierte Darstellungen generieren, die man als extreme Welten bezeichnen kann. Die Vereinheitlichung des zugrundeliegenden wissenschaftlichen Kontexts hat jedoch noch weitere Folgen. Mathematische Modelle bestehen aus den bereits genannten mathematischen Elementen und aus Beziehungen zwischen diesen Elementen. Wovon sie dabei vollständig abstrahieren, ist die epistemische Komplexität der zugrundeliegenden wissenschaftlichen Kontexte. Diese zeigt sich in den unterschiedlichen epistemischen Quellen der mathematisierten Beziehungen. Diese Quellen können physikalische (first principles) und phänomenologische Gesetze sein. Letztere sind zwar hinreichend begründet, haben aber nur einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich, wie beispielsweise das Hooksche Gesetz. Quellen können aber auch halbempirische Hypothesen sein, die auf theoretischen Überlegungen basieren, jedoch nur empirisch überprüfbar sind. Schließlich fließen in die mathematischen Modelle auch rein empirische Hypothesen ein, die aus experimentellen Untersuchungen stammen und nur lokale Gültigkeit besitzen.⁹ Die Rede vom mathematischen Modell als dem theoretischen Modell einer wissenschaftlichen Simulation ist also mit Vorsicht zu genießen. Das mathematische Modell ist ein Sammelsurium theoretischer, phänomenologischer und empirischer Versatzstücke, deren unterschiedliche Gültigkeitsbereiche durch die mathematische Struktur nivelliert

8 Diese Nebenadäquatheit eines mathematischen Modells erweist sich als wichtiger Faktor. „Je größer die Nebenadäquatheit, desto breiter ist der Anwendungsbereich des Modells und desto ‚zuverlässiger‘, ‚dauerhafter‘ ist das Modell. Die Nebenadäquatheit eines Modells erhöht sich mit Verstärkung der Rolle, die in ihm universelle physikalische Gesetze (wie zum Beispiel der Energieerhaltungssatz), geometrische Sätze, im untersuchten Bereich bewährte Anwendungsformen der mathematischen Analysis u.a. spielen“ (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 155).

9 Die Strömungsdynamik als empirische Wissenschaft wurde bereits als typisches Beispiel genannt: „In 1896 a textbook on ballistics lists in chronological order 20 different ‚laws of air resistance,‘ each one further divided into various formulae for different ranges of velocity. [...] No physical theory could provide a logical framework for justifying these empirical ‚laws‘“ (Eckert 2006: 26).

werden. Zwar ist sich jeder gute Modellierer dieser Nivellierung bewusst und wird ihr auch in Form von Limitierungen des Modells Rechnung tragen – beispielsweise indem er das Modell adäquat bezeichnet und damit auf gängige Idealisierungen und Abstraktionen verweist (z.B. elastisches Modell oder Modell des laminaren Flusses). Doch mit den rein empirischen Annahmen verändert sich die epistemische Struktur des mathematischen Modells, sofern funktionale Module in das Modell integriert werden, die das aktuelle, vor Ort beobachtete oder gemessene Verhältnis von Eingabe- und Ausgabeparametern modellieren. Wie sich Änderungen der Eingabeparameter auswirken können, ist bei diesen Modulen nicht bekannt, da keine Kenntnis der Transformationsprozesse zwischen Eingabe- und Ausgabeparametern vorhanden sind. Die Auswirkungen dieser rein empirischen Annahmen auf das Gesamtmodell sind daher nur schwer einzuschätzen.

Ein weiterer Aspekt der epistemischen Komplexität der zugrundeliegenden wissenschaftlichen Kontexte zeigt sich in der Wahl der bestimmenden Zustandsgrößen eines Modells und in der Hierarchie dieser Größen. Die Wahl der bestimmenden Größen charakterisiert den Zustand des Modells. Die Veränderungen dieser Größen ergeben dessen räumliche und zeitliche Entwicklung. So wurden für das grundlegende Modell der globalen Zirkulation der Atmosphäre von Vilhelm Bjerknes sieben bestimmende Zustandsgrößen identifiziert (vgl. Bjerknes 1904). Zu diesen Zustandsgrößen können weitere hinzukommen, um das Modell realitätsnaher zu gestalten. Beispielsweise können neben rein mechanischen Größen physikalische oder chemische Zustandsgrößen in das Modell integriert werden. Doch diese Zustandsgrößen besitzen ihre eigene epistemische Komplexität, die sich in Form räumlich und zeitlich unterschiedlicher Skalierungen zeigt. Zustandsgrößen können lokal oder global wirken, sie können langsam oder schnell veränderliche Größen sein. Aus dieser Durchmischung von Wirkungsreichweiten und Veränderungstempi beziehen die Modelle ihre Skalenprobleme. Vor allem Klimamodelle sind von solchen Skalenproblemen betroffen, denn die atmosphärischen Bewegungsvorgänge reichen von Mikroturbulenzen im Sekunden- und Millimeterbereich bis zu Planetarischen Wellen im Jahresgang und in Größenordnungen von Tausenden von Kilometern. Diese unterschiedlichen Bewegungen ergeben in ihrem Zusammenwirken die globalen und regionalen Bewegungsmuster der Atmosphäre. Eine adäquate Analyse des mathematischen Modells untersucht daher die Grundgrößen sowie deren Abhängigkeiten und erstellt eine Hierarchie der Zustandsgrößen eines Modells. Anhand dieser Hierarchie lassen sich Entscheidungen über die weitere Handhabung treffen: Langsam veränderliche Größen können als Parameter vorgegeben und schnell veränder-

liche durch Mittelwerte berücksichtigt werden, während die normal veränderlichen Zustandsgrößen im Modell berechnet werden. Durch eine solche Analyse lässt sich ein mathematisches Modell wesentlich vereinfachen, insofern „sich ein geschlossenes System mathematischer Beziehungen ergibt, durch das die Grundvariablen verknüpft sind. Diese Beziehungen bilden dann das mathematische Modell erster Näherung. Ein mathematisches Modell in den Grundveränderlichen und Grundabhängigkeiten stellt die einfachste Variante dar und hat im allgemeinen eine bedeutend geringere Dimension, (d.h. es wird durch eine kleinere Zahl wesentlicher Freiheitsgrade charakterisiert) als ein Modell, das ohne Berücksichtigung der Hierarchie der Veränderlichen aufgestellt wurde“ (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 179, 180).

Worin genau liegt nun die Arbeit der mathematischen Modellierer? In der Regel werden mehrere mathematische Modelle generiert, die unterschiedlich komplex sind und unterschiedlichen mathematischen Zwecken dienen. Blechmann, Myskis und Panovko ziehen einen illustrativen Vergleich zum Modedesign. „Es gibt die künstlerischen Modegestalter, d.h. diejenigen, die für irgendwelche abstrakten Personen Modelle kreieren, und die Schneider, die nach Modealben mehr oder weniger erfolgreich den Schnitt für den betreffenden Kunden auswählen“ (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 204). Hieran zeigt sich die Art der mathematischen Modellierungspraktik, nämlich zwischen verschiedenen Abstraktionsniveaus zu wechseln. Die Modellierungspraktik besteht darin, mit Hilfe kalkülisierter Zeichensysteme Beziehungsmuster zu kreieren und diese dann qualitativ zu untersuchen, auch in Hinblick auf die Adäquatheit hinsichtlich des konkreten Untersuchungsbereichs. Diese qualitative Untersuchung schließt die Deduktion von Aussagen, Schlussfolgerungen und Lösungen mit ein, wie sie die Analysis ermöglicht. Um solche qualitativen Modelluntersuchungen vornehmen zu können, wenden Mathematiker wiederum extreme Praktiken an, die zu weiteren Vereinfachungen führen. So kann beispielsweise die Zahl der Freiheitsgrade eines Modells begrenzt werden.¹⁰ Oder es kann nützlich sein „zu verfolgen, welche Form die Ausgangs- als auch die Zwischenbeziehungen wie auch die Ergebnisse der Modelluntersuchung annehmen, wenn die Mo-

10 Um die Freiheitsgrade eines Modells einzuschränken lässt sich beispielsweise bei der Modellierung von Schiffsbewegungen für niederfrequente Schwingungen das Schiff als starrer Körper behandeln. Dadurch werden die Freiheitsgrade des Modells auf sechs begrenzt. Für hochfrequente Schwingungen wird das Schiff als elastischer Balken modelliert, was unendlich viele Freiheitsgrade zur Folge hat. Im ersten Fall erhält man als Resultat ein Schwanken, im zweiten Fall eine Vibration des Schiffes.

dellparameter oder deren charakteristische Kombinationen ihre zulässigen Grenzwerte annehmen – meistens null oder unendlich. In solchen extremen Situationen vereinfacht sich die Aufgabe oder sie entartet, wobei die Beziehungen übersichtlicher werden und daher leichter kontrollierbar werden können“ (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 202). Einer der häufigsten Aussagetypen mathematischer Vereinbarungen in Modelluntersuchungen lautet wohl, „wir definieren: $x = 0$ “.¹¹

Extreme Welten II

Doch es wären keine mathematischen Modelle, wenn sich diese nicht auch quantitativ untersuchen ließen. Hier beginnt der Bereich der Simulation, auch wenn dabei Computer noch nicht zwingend ins Spiel kommen müssen. Überschlagsrechnungen oder Berechnungen für sehr einfache Fälle lassen sich allemal mit Bleistift und Papier oder mit Rechenschiebern ausführen. Wie auch immer die Berechnungen vollzogen werden, die mathematischen Modelle geben keine Rechenvorschriften dafür an. Ein Mathematiker oder ein mathematisch geschulter Wissenschaftler hat diese im Kopf. Hier liegt der maßgebliche Unterschied zwischen einem mathematischen Modell und dem Modell, das einer Simulation zugrunde liegt. Letzteres ist das Modell einer Rechenvorschrift für ein bestimmtes mathematisches Modell. Es ist eine komplett neue Darstellung des mathematischen Modells aus Perspektive seiner quantitativen Berechenbarkeit. Hier zeigt sich in der Forschungspraxis der Perspektivwechsel, den Wissenschaftler vollziehen, wenn sie als Untersuchungsmethode ihrer mathematischen Modelle deren numerische Berechnung wählen. Denn nun kommen Bedingungen der Berechnung ins Spiel, die heutzutage Bedingungen der automatischen elektronischen Rechenmaschinen, also der Computer sind. Diese Bedingungen sind nicht nur hinreichend, sondern notwendig, um ein mathematisches Modell numerisch zu simulieren. Ein wissenschaftlicher Programmierer muss daher weniger Beziehungsmuster zwischen Zustandsgrößen kreieren und diese qualitativ untersuchen, als vielmehr diese Beziehungsmuster in die Bedingungen der Berechenbarkeit einpassen und dadurch prak-

11 Die Verkehrung des Blicks auf die Welt aus extremer Perspektive zeigt sich an folgender Anekdote. „Wie verfährt denn der Mathematiker [auf die Frage, wie man einen Löwen in der Wüste fängt]? [...] Er definiert zunächst, was es heißt einen Löwen zu fangen. Das bedeutet, den Löwen von sich durch ein Gitter abzutrennen. Ich setze mich hinter das Gitter, und der Löwe ist, nach Definition, gefangen“ (Blechmann, Myskis, Panovko 1984: 136).

tikable Rechenvorschriften mit möglichst geringen strukturellen Verlusten gegenüber dem mathematischen Modell erzeugen. Seine Aufgabe ist also eine andere, als die der mathematischen Modellierer, und sie greift auf ein anders gelagertes Repertoire an Praktiken zurück. Neben mathematischen Bedingungen gilt es informatische zu berücksichtigen.¹² Diese informatischen Bedingungen umfassen die Diskretisierung des mathematischen Modells (Rechenvorschriften), die dynamischen Formierung dieser Rechenvorschriften in einen maschinentauglichen Ablauf (Programm) und die numerische Explizierung für die konkrete Berechnung (Computerexperiment).

Bevor auf einige der Praktiken der wissenschaftlichen Programmierung näher eingegangen wird, muss auf ein fundamentales Problem der Diskretisierung hingewiesen werden. „Da die Diskretisierung nicht eindeutig ist, muß die gewählte Differenzenapproximation nicht unbedingt zur richtigen Lösung führen. Die Eindeutigkeit einer Differenzenzlösung oder einer anderen finiten Approximation kann heute in der Regel nur für lineare Probleme nachgewiesen werden“ (Krause 1996: 15). Dies bedeutet, dass es für die meisten Fälle keinen Beweis gibt, dass das mathematische Modell (meist in Form von Differentialgleichungen) und das Modell der Rechenvorschrift (oft in Form von Differenzengleichungen) identisch sind. Das Modell der Rechenvorschrift muss daher als ein neues Modell angesehen werden, von dem man nur hoffen kann, dass es mit dem mathematischen Modell strukturell korrespondiert. Da es zudem verschiedene Diskretisierungsverfahren gibt, muss ein Modellierer sich für das seiner Meinung und Erfahrung nach am besten geeignete Verfahren entscheiden. Doch das Wissen um die Diskretisierung von Differentialgleichungen gehört nicht unbedingt zum Handwerkszeug eines Natur- oder Ingenieurwissenschaftlers. Diskretisierungen sind aufwendige Verfahren, die oft viele Monate bis einige Jahre Modellierungs- und Programmierungszeit in Anspruch nehmen können, wie beispielsweise für die Dynamik der globalen Atmosphärenmodelle. Daher wird in der Forschungspraxis öfter auf fertige Programme und Subroutinen, sogenannte PDE Partial Differential Equation Löser, für bestimmte Probleme zurückgegriffen.

12 Beide Bereiche lassen sich in der Forschungspraxis kaum trennen und werden heute in Ausbildungsgängen wie Technomathematik oder Scientific Computing gelehrt. Doch die Trennung zwischen mathematischer Modellierung und wissenschaftlicher Programmierung bleibt in den Arbeitsschritten erhalten, die einer Simulation vorausgehen.

„So findet man z.B. schon 1988 [...] über 950 verschiedene Finite-Elemente Codes. [...] Da man davon ausgehen muß, daß er [Anwender von PDE-Lösern] in seinem eigenen Studium kaum Ausbildung in Theorie und Numerik partieller Differentialgleichungen erhalten hat, und seine Kenntnisse über PDEs daher nicht sehr groß sind, muß man mit zwei sich gegenseitig verstärkenden Schwierigkeiten rechnen: Einmal muß man annehmen, daß ein guter Überblick über die aktuelle Methodenlandschaft fehlt, so daß nicht selten in unbekümmerter Weise die exotischsten Gleichungskombinationen aufgestellt werden, für die dann anschließend nur sehr schwer geeignete Software zu finden ist (wenn es sie denn überhaupt gibt). Zum zweiten verleitet die fehlende Kenntnis dazu, die jeweils zuerst gefundene halbwegs funktionierende numerische Methode zu verwenden, was zu einer ineffizienten und unsicheren Numerik führen kann sowie in der Folge zur Verschwendung personeller Ressourcen und Rechenzeit“ (Fuhrmann, Kleis, Mackens 1996: 119, 120).

Wie gut auch immer das mathematische Modell sein mag, bereits die Diskretisierung kann es in ein unzulängliches Modell verwandeln. Da das Diskretisierungsverfahren jedoch eine notwendige Voraussetzung der Simulationen ist, sind die anschließenden Berechnungen mit Vorsicht zu genießen. Doch bis zur Berechnung ist es ein weiter Weg. Die Diskretisierung muss in ein Computerprogramm übersetzt werden, sofern auf keine fertigen Softwareprogramme zurückgegriffen wird. Auch wenn Programmierer heute keine Rechenvorschriften mehr in Maschinensprache formulieren, so ist die Aufgabe der Codierung immer noch dieselbe wie vor gut sechzig Jahren. „These equations and conditions, which are usually of an analytical and possibly of an implicit nature, must be replaced by arithmetical and explicit procedures. [...] This step has, at least, nothing to do with mechanization: It would be equally necessary if the problems were to be computed ‚by hand‘. [...] Coding begins with the drawing of the flow diagrams“ (Goldstine, von Neumann 1947: 99, 100). Die Codierung transformiert das statische Konzept der Rechenvorschrift eines mathematischen Modells in dynamische Abläufe. Dazu werden die bislang durch mathematische Zeichenkonventionen dargestellten Operationen in abarbeitbare Anweisungen übersetzt, wobei jede Anweisung sich aus der vorherigen ergeben muss. Codierung bedeutet die Ausbuchstabierung der mathematisch notierten Operationen in Form maschinentauglicher Anweisungen. Zwar muss sich jede Anweisung eines Programms aus der vorherigen ergeben, doch sind hier keine logischen Folgerungen oder Deduktionen gemeint, sondern explizite Prozeduren der Art ‚do (if ... then ... else ... end if)ⁿ end do, return‘. Hier liegt ein weiterer, sehr entscheidender Unterschied zum mathematischen Modell. Die Codierung des Modells der Rechenvorschrift folgt zwar der logischen Struktur des mathematischen, aber eben nicht in

einem deduktiven Sinne. Die mathematische Struktur wird in Hinblick auf die Berechnung des Modells informatisch rekonstruiert.

Die Ausbuchstabierung der mathematischen Operationen in maschinen-taugliche Anweisungen wiederum verlangt die Ausbuchstabierung der veränderlichen Zustandsgrößen und Parameter eines Modells für den kompletten, diskreten Berechnungsraum. Das bedeutet, dass die Zustandsgrößen und Parameter – im mathematischen Modell einfache Symbole wie etwa Q_{mli} für das Schmelzen des Eises in einer Wolke – nun für sämtliche Knotenpunkte eines Berechnungsrasters berücksichtigt werden müssen. Beide Arten der Ausbuchstabierung sind im Ergebnis extrem, denn sie lösen die eleganten Notationen, die sich unter Umständen auf ein Blatt Papier schreiben lassen, in Tausende von Codezeilen und Tausende von Berechnungspunkten auf.¹³ Generieren sich die extremen Welten der mathematischen Modelle aus den Formalismen, die in extrem abgekürzter und allgemeiner Form notiert werden, so lösen die extremen Welten der codierten Rechenvorschriften diese Abkürzungen in zahllose Einzelanweisungen und Konkretisierungen auf. Dabei tritt ein semiotisches Paradox zu Tage, denn der symbolische Umgang mit Unendlichkeiten muss in endliche Anweisungen aufgelöst werden oder durch Abbruchkriterien erzwungen werden, wenn man am Ende effektive Rechenvorschriften für die konkrete Ausführung haben möchte. Unendlichkeit wird durch Iteration und Rekursion faktisch simuliert. Die extremen Welten der codierten Rechenvorschriften sind durch semiotische Explizitheit und iterative Selbstbezüglichkeit charakterisiert.

Doch es ist nicht nur die Menge der einzelnen Anweisungen und Berechnungspunkte, in die ein komplexes Problem wie das der Klimaprojektion zerlegt werden muss, um ein codiertes Modell seiner Rechenvorschriften zu erhalten. Die einzelnen Anweisungen müssen in Form einer komplexen Choreographie von Abläufen, Schleifen und Entscheidungspfaden strukturiert werden. Diese Choreographie zerlegt die Si-

13 Diese Aufteilung darf nicht willkürlich sein, wie bereits Vilhelm Bjerknes 1904 angemahnt hat. „Alles wird darauf ankommen, daß es gelingt, in zweckmäßiger Weise dies als ein ganzes, überwältigend schwieriges Problem in eine Reihe von Partialproblemen zu zerlegen, deren keines unüberwindliche Schwierigkeiten darbietet. [...] Vor allem wird dabei [bei der Diskretisierung mithilfe der endlichen Differenzenrechnung] die erste Zerlegung grundlegend sein. Sie muß einer natürlichen Teilungslinie im Hauptproblem folgen. Eine solche natürliche Teilungslinie läßt sich auch angeben. Sie folgt der Grenzlinie zwischen den speziell dynamischen und den speziell physikalischen Prozessen, aus welchen die atmosphärischen Prozesse zusammengesetzt sind. Die Zerlegung längs dieser Grenzlinie gibt eine Zerlegung des Hauptproblems in rein hydrodynamische und rein thermodynamische Partialprobleme“ (Bjerknes 1904: 4).

multanität der Prozesse, die ein Phänomen wie den Zustand der Atmosphäre ausmachen, in nacheinander abarbeitbare Teilprozesse, die Zeitschritt für Zeitschritt für die Menge aller Berechnungspunkte das Phänomen iterativ erzeugen. Erst diese Choreographie ergibt das Programm. Das, was John von Neumann 1947 graphisch mit Flow Charts darstellte, indem er ein Programm als eine Folge von Operationsboxen zeichnete, die linear oder in Schleifen durchlaufen werden, wird in einem Programm durch explizite Anweisungen vorgegeben. Welche Pfade dabei durchlaufen werden und ob diese der mathematischen wie der beobachteten und gemessenen empirischen Struktur nahekommen, hängt von der Qualität der Programmierung ab. Die in Abbildung 15 (Dateiendurchlauf) und Abbildung 16 (Flow Chart der Prozesse der cloud.f90 Datei) dargestellte Zerlegung und Choreographie eines Atmosphärenmodells vermitteln einen Eindruck von der Komplexität des wissenschaftlichen Programmierens.

Auf dem Weg zur Simulation beziehungsweise zum Computereperiment ist jedoch noch ein weiterer Schritt von Nöten. Denn erst die numerische Explizierung der codierten Rechenvorschriften macht diese überhaupt berechenbar. Jede Konstante und jeder Parameter müssen numerisch expliziert werden, wie das Codebeispiel des Schmelzvorganges in stratiformen Wolken zeigte. Jede Zustandsgröße bedarf für jeden Berechnungspunkt der numerischen Initialisierung, in der Regel auf Basis von Messwerten. Diese numerische Explizierung ist heikel, denn hier kommt der Nicht-Eindeutigkeit der finiten Approximation eine besondere Bedeutung zu. Der Vorteil der computerbasierten Simulationsmodelle liegt zwar in ihrer komplexeren Struktur und damit in der Ent-Extremalisierung der mathematischen Modelle. Computerbasierte Modelle und deren Simulation erlauben es, mehr Zustandsgrößen und relevante Parameter zu berücksichtigen, Abhängigkeiten nicht eliminieren oder linearisieren zu müssen, komplexere geometrische Formen wählen zu können und nicht nur extreme Bedingungen studieren zu müssen. Kurz gesagt: Der Computer ermöglicht es, die Freiheitsgrade eines Systems beliebig zu erweitern. Doch durch diese Komplexität und die unendlichen Möglichkeiten der Wechselwirkungen in einem System mit vielen Freiheitsgraden wird die numerische Lösung sensitiv abhängig von ihrer numerischen Initialisierung. Geringfügige Änderungen in der Initialisierung können zu vollkommen anderen Resultaten führen und von der eigentlichen Lösung wegführen. Da es keinen Nachweis der Eindeutigkeit der finiten Approximation gibt, kann man nicht beurteilen, ob die Resultate des berechneten Systems dem mathematischen Modell überhaupt entsprechen. Forschungspraktisch wird mit diesem prinzipiellen Problem wie bereits dargestellt verfahren. „Der Laxsche Äquiva-

lenzsatz sagt aus, daß der Nachweis der numerischen Stabilität die notwendige und hinreichende Bedingung für die Konvergenz der Lösung darstellt, wenn die Differenzenapproximation konsistent formuliert ist. Unter einer konsistenten Formulierung versteht man, daß die Differenzenapproximation wieder in die zu approximierende Differentialgleichung übergeht, wenn die Abstände der Gitterpunkte gegen Null streben. Eine Differenzenapproximation wird numerisch stabil genannt, wenn bei der Auflösung der resultierenden Differenzengleichungen Abbruch-, Rundungs- und Verfahrensfehler nicht beliebig anwachsen“ (Krause 1996: 15). Doch die Tücke steckt im Detail. Denn die Stabilität, welche ein Indiz für die Konsistenz der finiten Approximation ist, lässt sich nur empirisch durch Konvergenztests nachweisen. Da das Lösungsverhalten der finiten Approximation eines komplexen Systems von den Anfangs- und Randbedingungen abhängig ist, lässt sich dieser Nachweis der Konvergenz nur für das spezifische Setting eines einzelnen Computereperiments führen, nicht generell für das zugrunde liegende Modell der Rechenvorschriften. Daher wird jeder Simulationslauf eines Computereperiments mit einem Testlauf in höherer Auflösung auf seine Stabilität hin überprüft. „Anfangsbedingungen gelten jedoch vielfach als kontingent, als nicht zum Kern von Modellen, Gesetzen und Theorien gehörend. Statische und dynamische Instabilitäten beziehen sich auf Anfangsbedingungen sowie auf die Lösung von Differentialgleichungen, auf Trajektorien“ (Schmidt 2008: 93). Dies bedeutet, dass nicht nur die Diskretisierung ein gutes mathematisches Modell in ein unzulängliches Simulationsmodell verwandeln, sondern auch die Wahl der Anfangs- und Randbedingungen die Ergebnisse unbrauchbar machen kann. Auch wenn es mittlerweile für zahlreiche Probleme mehr oder weniger gute PDE-Löser gibt, für die Wahl der Anfangs- und Randbedingungen sowie für Parametrisierungen gibt es keinerlei Anleitung für eine adäquate Darstellungsweise. Jede kleinste Änderung im experimentellen Setting erfordert eine neue Überprüfung, jedes Ergebnis ist nur in Hinblick auf seine numerische Initialisierung gültig. „Damit ist ein möglicherweise paradox erscheinender Doppelaspekt der Berechenbarkeit gekennzeichnet: Einerseits weist die nach-moderne Physik auf prinzipielle Grenzen der (quantitativen) Berechenbarkeit hin und fördert damit die Erkenntniskepsis, andererseits erweitert sie (partiell quantitative und insbesondere qualitative) Prognosehorizonte und tritt erkenntnisoptimistisch auf“ (Schmidt 2008: 267).¹⁴

14 Allerdings bezieht sich Jan Schmidt hier nicht auf die Konvergenztests, sondern auf nichtlineare Zeitreihenanalysen und Analysen der Attraktor-geometrie zur qualitativen Überprüfung der gewonnenen Resultate (vgl. Schmidt 2008).

Die Ent-Extremalisierung der mathematischen Modelle, indem durch die Simulation komplexere Systeme modelliert und untersucht werden können, wird durch einen neuen Typ an Extremalität erkaufte.¹⁵ Die extremen Welten I der mathematischen Modelle werden in abgemilderter Form in extreme Welten II transformiert, wobei diese Transformation zwar nicht beliebig ist, aber eben auch nicht korrespondierend im Sinne einer eindeutigen Abbildung. Der Charakter der extremen Welten II generiert sich aus der iterativen Selbstbezüglichkeit der ausbuchstabierten Operationen in Form maschinentauglicher Anweisungen, deren Neuordnung basierend auf komplexen Choreographien und aus der numerischen Explizierung jeder einzelnen Konstante wie auch Variable für jeden Berechnungspunkt. Auf diese Weise werden die bereits durch die mathematischen Modelle abstrahierten Phänomene in mehr oder weniger willkürliche Prozessabläufe zerlegt und während des Durchlaufs durch die einzelnen Prozesse wieder zusammengesetzt.¹⁶ Da es lediglich Erfahrungswerte gibt, wie eine adäquate Zerlegung eines Problems, wie ein optimales Ablaufschema und wie eine gute numerische Explizierung auszusehen hat, betritt die computerbasierte Wissenschaft hier Neuland. Neben den prinzipiellen Problemen der quantitativen Berechenbarkeit sind es die informatischen Praktiken, die Wissen neu organisieren, indem sie mathematisch formuliertes Wissen numerisch zugänglich machen. Hier liegt die Bedeutung des Computers als Instrument der automatisierten Extrapolation. Dabei handelt es sich um mehr als nur um einen anderen Umgang mit mathematischen Modellen. Es handelt sich um eine neue mathematische Sprache. „Now mathematics has again been given a powerful new language, the language of algorithms and data structures, and with it a new vision of mathematical reality“ (Greenleaf 1992: 196).¹⁷

-
- 15 Johannes Lenhard beschreibt die Folgen dieser beiden Formen der Extremalität für die Wissenschaft als ‚artificiality-for-essence‘ und ‚artificiality-for-performance‘ (vgl. Lenhard 2010).
- 16 Kehrt sich in der Neuzeit und der Moderne die auf Aristoteles gründende Methode der Auflösung und Zusammensetzung der Phänomene in eine induktiv-deduktive Rekonstruktion der Phänomene um und führte zum hypothetisch-deduktiven Forschungsstil, so findet mit den Computereperimenten und ihren Visualisierungen eine neue Art der Auflösung und Zusammensetzung der Phänomene statt.
- 17 Newcomb Greenleaf bezieht sich in seinem Artikel *Algorithmics: A New Paradigm for Mathematics* zwar vor allem auf die Bedeutung der algorithmischen Sprache für die reine Mathematik, insbesondere bezüglich deduktiver Beweisverfahren und berechenbarer Funktionen. Doch die Wirkung dieser neuen Sprache der Mathematik zeigt sich am deutlichsten in der angewandten Mathematik und hier als Basis der Computereperimente (vgl. Greenleaf 1992).

Erweiterung der mathematischen Anschauung

Folgt man den bisherigen Überlegungen, so ist die Relation zwischen Untersuchungsobjekt, mathematischem Modell_m und Lösung (respektive Simulation via computerbasiertem Simulationsmodell_c) – wie sie den Überlegungen von Blechmann, Myskis und Panovko (1) sowie den meisten Autoren zum Thema der wissenschaftlichen Simulation zugrunde liegt (2) – zu einfach gedacht.¹⁸ Aus Perspektive des Computers als dem bedingenden Medium betrachtet, stellt sich die Beziehung etwas komplexer dar (3), wie in Abbildung 22 dargestellt. Die Relation für (1) würde im Idealfalle bedeuten, dass das mathematische Modell und das Untersuchungsobjekt strukturell isomorph sind und dass aus dem mathematischen Modell eine eindeutige Lösung deduziert werden kann. Dies ist, wenn überhaupt, nur für sehr einfache Systeme der Fall. Da Simulationen in der Regel komplexe Systeme zum Untersuchungsobjekt haben, sieht die Relation für (2) etwas komplizierter aus. Das mathematische Modell und das Untersuchungsobjekt können zwar als strukturell isomorph angesehen werden, dies hängt von der jeweiligen wissenschaftstheoretischen Position ab. Da das mathematische Modell in ein computertaugliches transformiert werden muss, wird hier meist angenommen, dass sich beide Modelle im Sinne einer strukturellen Abbildung entsprechen. Die Lösung wird als Simulation gewertet, die keine eindeutig deduzierte ist, sondern nur eine, mit Unsicherheitsfaktoren behaftete approximierte.

Trägt man aber nun der Medienwende durch den Computer respektive der Algorithmierung Rechnung, so verkompliziert sich die Relation ein weiteres Mal, wie in (3) dargestellt. Selbst wenn man in allen Punkten der Position (2) folgt, so ist es doch sinnvoll den Übergang von Modell_m zu Modell_c näher zu untersuchen.¹⁹ Dabei sind vor allem zwei Aspekte interessant: die Art des Übergangs zwischen I und II sowie dessen Erweiterungsfunktion bezüglich der mathematischen Anschauung.

18 Interessanterweise sorgt der erste Übergang vom Untersuchungsobjekt zum Modell_m bei Wissenschaftsphilosophen und -theoretikern seit vielen Jahrzehnten für Diskussion, während der zweite Übergang von Modell_m zu Modell_c als relativ unproblematisch angesehen wird. Es wird hier nicht argumentiert, dass der Übergang von Modell_m zu Modell_c nicht zur Kenntnis genommen würde. Aber er wird in seiner Auswirkung unterschätzt.

19 Dieser Übergang von Modell_m zu Modell_c ist hier als Transformation der extremen Welt I der mathematischen Modelle in die extreme Welt II der codierten Modelle der Rechenvorschriften, die das in-silico Experimentalsystem konstituieren, bezeichnet.

(1) Untersuchungsobjekt \rightarrow Modell_m \rightarrow Lösung

(2) Untersuchungsobjekt \rightarrow Modell_m \approx Modell_c \rightarrow Simulation

(3) Untersuchungsobjekt \rightarrow extreme Welt_I || extreme Welt_{II} \rightarrow Simulation

Abbildung 22: Übergang vom mathematischen zum computerbasierten Modell aus unterschiedlichen Blickwinkeln (Gramelsberger 2009)

Der Übergang von der extremen Welt I der mathematischen Modelle in die extreme Welt II der codierten Modelle der Rechenvorschriften ist kein Abbildungsverhältnis. Der Übergang initiiert eine semiotische Transformation der mathematisch symbolisierten Operationen in explizite und choreographierte Anweisungen. Diese semiotische Transformation lässt sich auch als Wechsel von der intrasymbolischen Denotation in die intrasymbolische Indexikalisierung verstehen. Intrasymbolische Denotation meint die Denotation von Operationen mittels mathematischer Symbole, beispielsweise durch ein Integralzeichen oder ein Differentialzeichen. Sofern sich das mathematische Zeichen auf eine mathematische Operation bezieht und nicht auf einen extrasymbolischen Kontext, ist die Denotation als eine intrasymbolische zu verstehen, wie sie der Formalisierung und Kalkülierung von Zeichensystemen entspricht.²⁰ Intrasymbolische Indexikalisierung hingegen meint das Anzeigen einer Operation durch ein Zeichen (Code), die von einer Maschine tatsächlich ausgeführt wird. In dieser doppelten Funktion der Zeichen eines Computerprogramms – als Symbol, wenn der Code gelesen wird, wie auch als Index, wenn der Code ausgeführt wird – liegt die Bedeutung der Algorithmen als neue Sprache der Mathematik. Algorithmen sind insofern eine neue Sprache, als sie eine andere Darstellungsweise der mathematischen Operationen und Elemente bedingen, denn die symbolisierten Operationen müssen mit automatischen Rechenmaschinen ausführbar sein. Dazu bedarf es der Diskretisierung und der Ausbuchstabierung der Operationen in einzelne, abarbeitbare Anweisungen, der Choreographie der Abarbeitungsabläufe sowie der numerischen Explizierung. Man wird also vergeblich nach Integral- oder Differentialzeichen im Code Ausschau halten, denn die mathematischen Operationszeichen müssen in strukturierte Indexzeichen übersetzt werden, die wiederum den Ablauf der Maschinenanweisungen zur Folge haben. Die Ge-

20 Die verwendeten Zeichen besitzen keine extrasymbolische Bedeutung mehr, denn „die Grundidee der Formalisierung besteht darin, das Manipulieren von Symbolreihen von ihrer Interpretation abzutrennen“ (Krämer 1988: 176).

samtheit dieser Anweisungen und Indexzeichen stellt die Übersetzung des mathematischen Operationszeichens dar.

Die Frage, die sich dabei aufdrängt, ist die, ob die symbolisierten Operationen mit ihren Indexikalisierungen, also ihren Handlungsumsetzungen, identisch sind. Ob die Rechenvorschriften, die Mathematiker im Kopf haben und die sie auf Papier anwenden mit den maschinentauglichen Rechenvorschriften identisch sind, in anderen Worten: Ob die Übersetzungen geglückt sind. Dies mag für einfache Operationen in bestimmten Operationsräumen wie die Addition oder die Subtraktion im Operationsraum der ganzen Zahlen zutreffen. Für kompliziertere Operationen und insbesondere für Operationen, die mit Unendlichkeiten hantieren, sind Symbolisierung und Indexikalisierung nicht mehr identisch – wie die Nichteindeutigkeit der finiten Approximationsverfahren dokumentiert. Doch ohne eine Identität, die in mathematischen Welten immer nur eine strukturelle sein kann, kann der Übergang vom mathematischen Modell in das ComputermodeLL kein Abbildungsverhältnis sein. Es ist ein mehrdeutiger Übergang, der das mathematische Modell mit seinem codierten Modell der Rechenvorschriften locker koppelt. Diese Art der Kopplung wurde bereits bezüglich des Zusammenhangs zwischen einem in-silico Experimentalsystem (codiertes Modell der Rechenvorschrift) und seinen computerexperimentellen Resultaten als kohäsiv beschrieben. Der Begriff der Kohäsion lässt sich auch gut auf die Kopplung zwischen mathematischem Modell und dem Modell der Rechenvorschriften (in-silico Experimentalsystem) anwenden. Da Kohäsion hergestellt werden muss, im Unterschied zur Kohärenz, die sich zwingend aus dem Verfahren wie der Deduktion ergibt, bedarf es geeigneter Praktiken. In der computerbasierten Mathematik sind dies Konvergenztests zur Prüfung der Stabilität, die gemäß des Laxschen Äquivalenzsatzes wiederum ein Indiz für die Konsistenz der finiten Approximation ist. Nichtlineare Zeitreihenanalysen oder Analysen der Attraktorgeometrie wären weitere Praktiken zur Herstellung von Kohäsion zwischen mathematischem Modell und Simulationsmodell, die jedoch immer nur anhand der Interpretation der berechneten Resultate möglich sind.

Die Transformation eines mathematischen Modells in ein codiertes Modell seiner Rechenvorschriften führt zwar einerseits weitere Limitierungen ein und transformiert die bereits extremen Welten I in neue extreme Welten II. Diese Limitierungen verstärken dabei den Antagonismus zwischen epistemischer Komplexität und den extremen Welten I und II durch die numerische Ersetzung algebraischer Strukturen und deren Berechnung. Bereits 1628 wies René Descartes in den *Regeln zur Ausrich-*

ung der Erkenntniskraft auf diese Form der Reduktion durch die Arithmetik hin.

„Wir dagegen [können] an dieser Stelle sogar von den Zahlen abstrahieren, ebenso wie kurz zuvor von den geometrischen Figuren und von jedem beliebigen Gegenstand. Wir tun das einerseits, um zum Überdruß langes und überflüssiges Rechnen zu vermeiden, andererseits vor allem, damit die Teile des Gegenstandes, die zur Natur der Schwierigkeiten gehören, immer getrennt bleiben und nicht durch unnütze Zahlen verhüllt werden. Wenn z.B. die Basis des rechtwinkligen Dreiecks gesucht wird, dessen Seiten 9 und 12 gegeben sind, wird der Rechner sagen, sie sei gleich $\sqrt{225}$ oder 15; wir aber werden 9 und 12 durch a und b setzen und die Basis als $\sqrt{a^2 + b^2}$ finden. So bleiben die beiden Teile a^2 und b^2 getrennt, die in der Zahl miteinander verschmolzen sind“ (Descartes 1628/1972: 75). Und weiter schreibt Descartes: „Dies alles unterscheiden wir, die wir eine evidente und deutliche Erkenntnis suchen, nicht aber die Rechner, die zufrieden sind, wenn ihnen das gesuchte Ergebnis unterläuft, selbst wenn sie nicht sehen, wie es von den Daten abhängt, obgleich allein darin die Wissenschaft eigentlich besteht“ (Descartes 1628/1972: 77).

Doch andererseits ermöglicht erst diese Transformation in die Computernumerik die Erweiterung der mathematischen Anschauung und konstituiert den „third type of empirical extension“ (Humphreys 2004: 5), der zunehmend für die Forschung genutzt wird.²¹ Auch wenn der Zusammenhang zwischen Resultat und Datenstruktur beim ersten Blick auf die Simulationsergebnisse verborgen bleibt und in der Datenanalyse rekonstruiert werden muss – was aufgrund der Nichteindeutigkeit der finiten Approximation nicht einfach ist – so eröffnen die Computerexperimente doch neue mathematische Möglichkeitsräume. Diese neuen Möglichkeitsräume erweitern in ihrer visualisierten Sichtbarkeit die mathemati-

21 Diese Transformation wurde bereits vor der Einführung der Computer zu Zwecken der Berechnung per Hand durchgeführt, beispielsweise um mechanische Quadraturen auszuführen. „Mechanical quadratures, a technique now called ‚numerical integration‘, was an alternative to Newton’s calculus. It solves a differential equation solely by numerical methods, with no reference to the original ellipse or any other curve“ (Grier 2005: 121). So genannte ‚computing plans‘ für numerische Integrationen wurden bereits 1757 aufgestellt, um das Erscheinungsdatum des Halleyschen Kometen zu berechnen. David Grier verortet daher den Beginn der Simulation im 18. Jahrhundert und lokalisiert ihn im Aufkommen arbeitsteiliger Berechnungen und erster Berechnungspläne (vgl. Grier 2005). Allerdings gewinnen diese Berechnungspläne erst durch die elektronischen Computer an weitreichender Bedeutung für die Wissenschaft. Die Erstellung von Rechenvorschriften respektive Berechnungsplänen wird erst ab den 1940er Jahren zu einem maßgeblichen Teil der Forschungspraxis.

sche Anschauung, allerdings weniger aufgrund ihrer Sichtbarkeit als aufgrund dessen, was sie zeigen. Doch was zeigt sich?

Die neuen Möglichkeitsräume zeigen, oder besser enthüllen, das, was die Wissenschaft seit der Neuzeit zum Ziel hat: den Blick ins Innere der Phänomene. „Every natural action depends on things infinitely small, or at least too small to strike the sense,“ schrieb Bacon 1620 im *New Organon*. „No one can hope to govern or change nature until he has duly comprehended and observed them“ (Bacon 1620: II. Buch VI). Dieser Blick ins Innere wurde in der Neuzeit als ‚Blick für Kausales‘ anhand instrumentenbasierter Beobachtung und Messung sowie der Mathematisierung von Theorie inauguriert und gestaltete das Sehen und Denken um. Doch diese Neukonfiguration des Blicks und des Denkens, also der zweite Typ der empirischen Extension und die physiko-mathematische Forschungslogik, gingen noch nicht tief genug. Daher monierte Osborn Reynolds 1877 zu recht: „Now the reason why mathematicians have thus been baffled by the internal motions of fluids appear to be very simple. Of the internal motions of water or air we can see nothing. On drawing the disc through the water there is no evidence of the water being in a motion at all, so that those who have tried to explain these results have had no clue; they have had not only to determine the degree and direction of the motion, but also its character“ (Reynolds 1877: 185). Sowohl der experimentelle Blick, wie von Reynolds vorexerziert, als auch der mathematische Blick mussten tiefer vordringen, wollten sie den Blick ins Innere der Phänomene tatsächlich erweitern. Was zunächst im 19. und 20. Jahrhundert experimentell möglich wurde und zur hypothetisch-deduktiven Forschungslogik führte, wurde mit dem Aufkommen der Computer komplettiert. Komplettiert insofern nun auch die Mathematik, als Kulturtechnik des Rechnens, der Koordination von Experiment, Messung und Theorie in denselben Darstellungsraum folgte. Denn durch die diskrete Metrik des Computers bewegt sich die computerbasierte Mathematik ausschließlich in dem durch Koordinaten metrisierten, rein symbolischen Raum der Mannigfaltigkeiten, dessen Sprache die Algorithmen sind.²² Leitete „das Projekt der neuzeitlichen Wissenschaft [...] seine Macht aus dem spezifisch technologischen Charakter der Darstellungsräume her. Die Kräfte und die Art von Überlegungen,

22 Diese Transformation in einen Raum der Mannigfaltigkeiten leistete bereits der Funktionsbegriff, der 1694 erstmals bei Leibniz auftaucht und in den folgenden Diskussionen mit Jakob Bernoulli und später durch Leonhard Euler allmählich Gestalt annimmt (vgl. Leibniz 1694; Euler 1748; Cassirer 1910). Der Computer stellt nun das passende Medium für den automatisierten Umgang mit Mannigfaltigkeiten dar.

die sie freisetzen, ebenso wie die Regeln, denen sie gehorchen, sind weniger die von cartesischen Subjekten als vielmehr die von technologisch-epistemischen Texturen“ (Rheinberger 2001: 243, 244). So leitet das Projekt der (post)modernen Wissenschaft seine Macht zwar ebenfalls aus dem spezifisch technologischen Charakter seiner Darstellungsräume her, allerdings hat sich dieser technologische Charakter durch den Computer grundlegend verändert. Diese Veränderung betrifft nicht nur die Computerexperimente, sondern ist grundsätzlicher Natur, denn jedes Messinstrument und jeder Detektor im experimentellen Umfeld ist mittlerweile mit Computerchips ausgestattet. Dies macht den Blick auf die Simulation aus Perspektive der traditionellen Verfahren – Theorie, Modell, Messung, Beobachtung – unmöglich, da die klassischen Verfahren so nicht mehr existieren, sondern ebenfalls in den veränderten technologischen Charakter der wissenschaftlichen Darstellungsräume eingepasst wurden. Die Computerisierung dieser Darstellungsräume entwickelte sich im Laufe der letzten sechzig Jahre zur grundlegenden Prämisse aktueller Forschung, ob in den in-silico Experimentalsystemen, in den globalen Messkampagnen oder in den Experimentalsystemen der Labore.²³

Doch die Frage, was sich zeigt, ist noch nicht ganz beantwortet. Die große mathematische Leistung der Neuzeit war die Auflösung der geometrischen Anschaulichkeit durch die Arithmetik. „Die anschauliche geometrische Linie löst sich kraft dieses Verfahrens in eine reine Wertfolge von Zahlen auf, die durch eine bestimmte arithmetische Regel miteinander verknüpft sind“ (Cassirer 1910: 95). Dies bedeutet, wie Ernst Cassirer in *Substanzbegriff und Funktionsbegriff* schreibt, dass die Raumbegriffe durch Zahlenbegriffe und infolge dessen durch Reihenbegriffe substituiert werden.

„Die Umsetzung der Raumbegriffe in Zahlenbegriffe erhebt daher zugleich das Ganze der geometrischen Forschung auf ein neues gedankliches Niveau. Die substantiellen Formbegriffe der antiken Geometrie, die in starre Absonderung einander gegenüberstanden, verwandeln sich kraft dieser Übertragung in reine ‚Reihenbegriffe‘, die nach bestimmten Grundprinzipien auseinander erzeugbar werden. [...] Erst die Umbildung des Gehalts der Geometrie schafft Raum für eine neue Logik der Mannigfaltigkeiten, die über die Grenzen der Syllogistik hinausgreift“ (Cassirer 1910: 93). „Die Auflösung der Raumbegriffe in Reihenbegriffe bleibt der leitende Gesichtspunkt; aber das System der Reihenbegriffe muß derart vertieft und verfeinert werden, daß dadurch nicht

23 Die Experimentallabore sind interessante Hybride traditioneller Experimentalsysteme kombiniert mit computerbasierten Technologien der Messung und Auswertung.

nur, wie bisher, ein enger Ausschnitt, sondern das Gesamtgebiet der möglichen räumlichen Gestaltungen überschaubar und beherrschbar wird. Diese Forderung ist es, kraft deren die Cartesische Geometrie sich mit innerer Notwendigkeit zur Infinitesimal-Geometrie erweitert“ (Cassirer 1910: 96).

Dieses Gesamtgebiet der möglichen Gestaltungen der Mannigfaltigkeiten konstituiert den mathematischen Möglichkeitsraum, der sich erst durch die enorme Rechenkraft des Computers entfaltet. Dabei müssen diese Gestaltungen nicht unbedingt anschaulich sein, insbesondere wenn sie höher dimensionale Objekte oder andere, für unsere Anschauungsgewohnheiten exotische Gebilde sind. Doch im wissenschaftlichen Anwendungskontext geht es um die Erforschung und die Anschaulichkeit dieser Möglichkeitsräume, da in physikalisch fundierten Kontexten die erzeugten Reihenbildungen als Trajektorien Auskunft über die Dynamik der zu untersuchenden Prozesse in Raum und Zeit geben. In dieser Traditionslinie stehend geben Computer Einblick in das Innere der Phänomene, indem sie das Innere aus Mannigfaltigkeiten rekonstruieren und es nach außen kehren, es umstülpen. Durch diese von Innen nach Außen gekehrten Ansichten entsteht ein interessanter Verfremdungseffekt, der sich darin zeigt, dass sich gegenwärtig das verändert, was wissenschaftlich als real gilt. Ebenso wie sich durch die charakteristische, symbolische Form der neuzeitlichen Forschung der wissenschaftliche Erfahrungsbegriff veränderte, wandelt er sich aktuell erneut.

3 SIMULATION ALS NEUE SYMBOLISCHE FORM DES FORSCHENS

Computer geben Einblicke in das Innere der Phänomene, indem sie das gesamte Gebiet der Mannigfaltigkeiten als mathematischen Möglichkeitsraum eröffnen. Genau hierin liegt der zweite Schritt der wissenschaftlichen Revolution der Neuzeit begründet (vgl. Glimm 1990), oder präziser ausgedrückt: Der Computer vollendet die wissenschaftliche Revolution der Neuzeit, indem er die bereits im mathematischen Formalismus enthaltenen Möglichkeitsräume numerisch entfaltet.¹ Die Quantität der Rechenkraft schlägt hier qualitativ zu Buche. Diese Vollendung kann mit Martin Heidegger gesprochen auch als Wesenserfüllung der Neuzeit gesehen werden, deren Grundvorgang „die Eroberung der Welt als Bild ist. Das Wort Bild bedeutet jetzt: das Gebilde des vorstellenden Herstellens. [...] Dabei] setzt der Mensch die uneingeschränkte Gewalt der Berechnung, der Planung und der Züchtung aller Dinge ins Spiel. Die Wissenschaft als Forschung ist eine unentbehrliche Form dieses Sicheinrichtens in der Welt, eine der Bahnen, auf denen die Neuzeit mit einer den Beteiligten unbekannten Geschwindigkeit ihrer Wesenserfüll-

1 Diese Extensivierung der numerischen Berechnung wird jedoch auch kritisiert als „the old vocabulary of sequential equations and numbers“ (Bailey 1996: 4). James Bailey argumentiert, dass „symbolic numbers, equations, and the formulation of universal laws are what people and thought are good at. Electronic circuits are good at different things [...], e.g.] at letting higher level behavior emerge from the interplay of millions of tiny operations, all interacting with each other in parallel, handing on each its own little bit of understanding. [...] As a result, a whole new set of parallel intermaths is coming to the fore to challenge the sequential maths of the Industrial Age, which had only humans to carry them out“ (Bailey 1996: 4).

lung zurast“ (Heidegger 1938/1977: 94). Das Bild zeigt sich in den Visualisierungen der computereperimentellen Resultate. Doch es ist kein Bild der Welt, sondern ein Bild der ‚Gebilde des vorstellenden Herstellens‘, konkret: der codierten Modelle der Rechenvorschriften mathematischer Gebilde. Das vorstellende Herstellen der Moderne ist dabei nirgends deutlicher realisiert als in den Algorithmen – dem perfekten Medium dieses vorstellenden Herstellens – insofern als Algorithmen Vorstellungen zugleich symbolisch repräsentieren als auch deren Herstellung indizieren. Dieses vorstellende Herstellen charakterisiert die symbolische Form der Simulation als neues Erkenntnisinstrument. Die Neuheit ergibt sich aus den Möglichkeiten des Herstellens (numerische Realisierung) und dessen Vorrang im Unterschied zum bloßen Vorstellen (Formalismus) der Neuzeit – zumindest mathematisch (nicht technisch) gesehen. Vorstellen ist dabei durchaus in der Doppeldeutigkeit der Interpretation Heideggers gemeint als anschauliches Vorstellen, beispielsweise durch ein mathematisches Modell, aber auch als Vor-die-Welt-Stellen im Sinne der deduktiv-induktiven und hypothetisch-deduktiven Forschungsstile. Das Vor-die-Welt-Stellen verstellt dabei nicht nur, kritisch gesprochen, den direkten Blick auf diese, sondern erweitert, positiv gewendet, die Wahrnehmung von Welt.

Die Fragen, die aus diesem neuen Sicheinrichten in der Welt folgen, lauten: Wie verändert sich wissenschaftliche Erfahrung und das, was als wissenschaftlich real gilt? Und, falls eine solche Veränderung sich aktuell vollzieht, welchen Einfluss hat dies auf unsere Lebenswelt? Denn, wie sich bereits bei der wissenschaftlichen Revolution der Neuzeit zeigte: „In the seventeenth century old practices changed and new ones appeared. Those changing practises represent shifts in the meaning of experience itself – shifts in what people saw when they looked at the events in the natural world“ (Dear 1995: 13). Diese Veränderung des wissenschaftlichen Blicks hatte Folgen über die Wissenschaft hinaus, denn die „Realität, die die Physik beschreibt, [ist] zur Realität der technologischen Gesellschaft geworden. Das physikalische Weltbild ist das Weltbild dieser Gesellschaft. Kein Wunder also, dass die physikalische Erkenntnis zum Ideal von Erkenntnis überhaupt werden konnte, denn diese Art der instrumentellen Beobachtung von Realität fügt sich passgenau in ein Selbstbild der Gesellschaft, das wesentlich durch eben diese Beobachtungsweise erst entstanden ist“ (Frederichs 1999: 21).

Welchen neuen Erfahrungsbegriff der Wissenschaft und welches Selbstbild der Gesellschaft sich aus der Vollendung der wissenschaftlichen Revolution durch den Computer ableiten werden, gilt es zu untersuchen. Dazu wird es notwendig sein, näher auf den Computer als Me-

dium sowie auf die (maschinentauglichen) Algorithmen als neue mathematische Sprache und den dadurch initiierten Medien- und Sprachwandel in der Wissenschaft einzugehen. Da sich mit dem Medien- und Sprachwandel ein Wandel der symbolischen Form wissenschaftlicher Forschung abzeichnet, liegt es nahe hier den epistemischen Kern des Wandels der Wissenschaft im Zeitalter des Computers zu vermuten.

Symbolische Formen des Forschens

In seiner dreibändigen *Philosophie der Symbolischen Formen* untersuchte Ernst Cassirer 1923 bis 1929 unterschiedliche Erfassungsmöglichkeiten der Welt wie den Mythos, die Sprache und die Wissenschaft (vgl. Cassirer 1923/1988, 1924/1987, 1929/1990). Er rekonstruierte die bereits ausführlich dargestellte Entwicklung der Wissenschaft anhand ihrer Symbolisierungsleistung. Sein Symbolbegriff greift den von Heinrich Hertz auf, der 1894 in seinen *Prinzipien der Mechanik* schrieb: „Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände“ (Hertz 1894: 1).² Cassirer ist jedoch nicht wie Hertz der Meinung, dass es zwischen Natur und Geist eine Übereinstimmung geben muss und daher die Bilder Abbilder naturnotwendiger Folgen sind. Vielmehr zeigt sich für Cassirer die Abgeschlossenheit der symbolischen Formen gerade an den Scheinbildern der Physik. „Die Begriffe, mit denen er [Hertz] operiert, die Begriffe des Raumes und der Zeit, der Masse und der Kraft, des materiellen Punktes und der Energie, des Atoms oder des Äthers sind freie ‚Scheinbilder‘, die die Erkenntnis entwirft, um die Welt der sinnlichen Erfahrung zu beherrschen und als gesetzlich-geordnete Welt zu übersehen, denen aber in den sinnlichen Daten selbst unmittelbar nichts entspricht“ (Cassirer 1923/1988: 17). Die Fortschritte in der Naturwissenschaft zeigen sich in der „zunehmenden Verfeinerung ihres Zeichensystems [...]. Die scharfe Erfassung der Grundbegriffe der Galileischen Mechanik gelang erst, als durch den Algorithmus der Differentialrechnung gleichsam der allgemeine logische Ort dieser Begriffe bestimmt und ein allgemeingültiges mathematisches Zeichen für sie geschaffen war“ (Cassirer 1923/1988:

2 Hertz schreibt weiter: „Damit diese Forderung überhaupt erfüllbar sei, müssen gewisse Übereinstimmungen vorhanden sein zwischen der Natur und unserem Geist“ (Hertz 1894: 1). Ob man diesem Korrespondenzgedanken zwischen Geist und Natur zustimmt, hängt von der jeweiligen wissenschaftstheoretischen Perspektive ab.

17). Dies ist möglich, weil das „Zeichen keine bloß zufällige Hülle des Gedanken, sondern sein notwendiges und wesentliches Organ“ ist (Cassirer 1923/1988: 18). Die begriffliche Bestimmung besteht in der Fixierung in Zeichen und dies gilt für jegliche Art geistigen Schaffens, nicht nur für die Wissenschaft. Dabei sind diese Zeichen nicht als Abbilder zu verstehen, sondern sie bergen eine eigentümliche Doppelnatur in sich, „ihre Gebundenheit ans Sinnliche, die doch zugleich eine Freiheit vom Sinnlichen in sich schließt“ (Cassirer 1923/1988: 42). Diese Doppelnatur macht es möglich mit den Symbolen Prägungen zu erzeugen, welche die unterschiedlichen Wirklichkeitsformen wie Mythos, Wissenschaft und Religion überhaupt erst möglich machen. „Der Mythos und die Kunst, die Sprache und die Wissenschaft sind in diesem Sinne Prägungen zum Sein: sie sind nicht einfach Abbilder einer vorhandenen Wirklichkeit, sondern sie stellen die großen Richtlinien der geistigen Bewegung, des ideellen Prozesses dar, in dem sich für uns das Wirkliche als Eines und Vieles konstituiert“ (Cassirer 1923/1988: 43).

Solange der Blick nur auf die Wirklichkeit gerichtet ist, schreibt Cassirer im dritten Band seiner *Philosophie der Symbolischen Formen*, ergibt sich ein Verhältnis unproblematischer Gewissheit zwischen Individuum und Welt. Tritt jedoch die Wahrheit in Form von Erkenntnis – als sich einen Begriff von der Welt machen – auf den Plan, so verändert sich das Verhältnis in ein prinzipiell anderes. „Alle bisherigen sichersten und zuverlässigsten Zeugen der ‚Wirklichkeit‘, die ‚Empfindung‘, die ‚Vorstellung‘, die ‚Anschauung‘ werden jetzt vor ein neues Forum gefordert und vor ihm verhört. Dieses Forum des ‚Begriffs‘ und des ‚reinen Denkens‘ wird nicht erst in dem Moment aufgerichtet, indem die eigentlich-philosophische Besinnung einsetzt; es gehört schon den Anfängen jeder wissenschaftlichen Weltbetrachtung an. Denn schon hier begnügt sich der Gedanke nicht damit, das in der Wahrnehmung oder Anschauung Gegebene einfach in seine Sprache zu übersetzen, sondern er vollzieht an ihm eine charakteristische Formveränderung, eine Umprägung“ (Cassirer 1929/1990: 330). Diese Umprägungen zeigen sich am Zweck der wissenschaftlichen Begriffe, Regeln der Bestimmung aufzustellen, die sich am Anschaulichen zu bewähren haben. Diese Regeln werden als „eine universelle Denkleistung erfaßt und als solche durchschaut. Und diese Schau ist es, die nunmehr eine neue Form des Durchblicks, der geistigen ‚Perspektive‘ erschafft“ (Cassirer 1929/1990: 331).

Hier kommt der Zahl als Denktypus die entscheidende Rolle zu, insofern sie dasjenige Zeichensystem zur Verfügung stellt, das Form- und Strukturbestimmungen par excellence ermöglicht. Daher fällt die Mathematik und mit ihr die Wissenschaft immer wieder auf die Zahl zurück. Doch dieser Rückbezug auf die Zahl durchläuft verschiedene Sta-

dien der Abstraktion bzw. im Sinne Cassirers verschiedene symbolische Formen, beginnend bei der symbolischen Form des Ausdrucks im Mythos.³ Sowohl der Mythos, als auch die griechische Mathematik haben die Zahl zum Grundmotiv ihrer Weltbetrachtung auserkoren, allerdings in jeweils unterschiedlicher Weise. Der Mythos nimmt die Zahl als Wesenheit, die Mathematik fasst sie als Begriff.⁴ Solange die Zahl in der griechischen Mathematik jedoch an räumliche Gegebenheiten gebunden war, blieb sie Anzahl einer konkreten Menge, und mit ihr blieb die Forschung auf die sinnlich-gegebene Welt bezogen. Erst als „die rein logische Natur der Zahl erkannt wird, kommt es zur Grundlegung einer reinen Wissenschaft der Zahl [... und die Zahl] hört auf ein physisch-Dingartiges zu sein oder nach der Analogie irgendwelcher empirischer Objekte bestimmbar zu sein“ (Cassirer 1929/1990: 331). Als solchermaßen logische Entität schafft die Zahl eine Distanz zwischen sich und der Wirklichkeit, welche die streng theoretischen Begriffe überhaupt erst ermöglicht und durch reine Denkarbeit Einsichten in die Wirklichkeit schafft, je mehr sie von dieser absieht. Durch diese erschaffende oder prägende Kraft der Zahl und der theoretischen Begriffe vollzieht sich ein Bruch mit der unmittelbaren Anschaulichkeit. Die Erkenntnis löst sich „aus der Verflechtung mit der konkreten und individuell-bestimmten ‚Wirklichkeit‘ der Dinge heraus, um sie sich rein als solche in der Allgemeinheit ihrer ‚Form‘, in der Weise ihres Beziehungs-Charakters zu vergegenwärtigen. Es genügt ihr nicht mehr, das Sein selber in den verschiedenen Richtungen des beziehentlichen Denkens zu durchmessen, sondern sie fordert und sie erschafft sich für diesen Prozeß auch ein universelles Maßsystem. Dieses System ist es, das im Fortgang des theore-

- 3 Cassirer unterscheidet im Wesentlichen drei symbolische Formen: Die Sphäre des Ausdrucks, die der sinnlich-gegebenen Wirklichkeit in direkten Ausdrucksbestimmungen Existenz zugesteht (Mythos). Die Sphäre der Darstellung, die in Form der Sprache zwar mimischen Ausdruckswert besitzt, aber durch zunehmende Loslösung von der sinnlich-gegebenen Wirklichkeit über Analogien zur Darstellungsform (Aussagesätze) und schließlich rein auf sich selbst bezogen zur symbolischen Sphäre der Bedeutung gelangt (Mathematik, Logik). Die Sphäre der Bedeutung konstituiert sich aus diesem rein symbolischen Gebrauch der Sprache als Zeichensystem, in welchem die Sprache zu sich selbst gelangt. Sie ist losgelöst von jeglicher sinnlich-gegebenen Wirklichkeit, aber bezogen auf diese. Diese neue Form der Bezogenheit zeigt sich in den wissenschaftlichen Begriffen und deren Durchblick auf die sinnlich-gegebene Wirklichkeit als neue geistige Perspektive.
- 4 In der Philosophie der Pythagoreer lassen sich beide Versionen, die mythische und die mathematische Auffassung der Zahl, noch finden. Die Zahl ist aber auch der Ursprung der Schrift (vgl. Koch 1997). Die Differenzierung zwischen Sprache und Schrift erfolgt in Cassirers Philosophie nur implizit, wenn er vom rein symbolischen Gebrauch der Sprache spricht.

tischen Denkens immer fester gegründet und immer umfassender gestaltet wird“ (Cassirer 1929/1990: 332, 333). Dabei wird die Ordnung nicht mehr durch die Gegenstände der Welt vorgegeben, sondern durch die selbständige Tätigkeit des Denkens hergestellt.

Dies ist jedoch nur möglich, indem sich ein Reich der Symbole in voller Freiheit herausbildet, das Schemata entwirft, an welchen die wissenschaftliche Wirklichkeit ausgerichtet wird, indem die Wortzeichen der natürlichen Sprache zu Begriffszeichen der theoretischen Wissenschaft werden.⁵ Dabei verändert sich die logische Dimension der Zeichen, die alles anschaulich-Repräsentative ablegen und zu reinen Bedeutungszeichen werden und als solche nur auf sich selbst bezogen sind. Jegliche mimische oder analogische Formung wird gegenstandslos und es bleibt die rein symbolische Formung übrig, in der die Sprache zu sich selbst kommt und in Folge auch die Wissenschaft. „Damit stellt sich eine neue Weise des ‚objektiven‘ Sinnbezugs dar, die sich von jener Art der ‚Beziehung auf den Gegenstand‘, wie sie in der Wahrnehmung oder der empirischen Anschauung besteht, spezifisch unterscheidet“ (Cassirer 1929/1990: 334).⁶ Die Frage, was die Begriffszeichen der Wissenschaft, losgelöst vom anschaulich-Repräsentativen bedeuten, beantwortet Cassirer mit deren Form- und Strukturbestimmungen, die Ordnungen des Möglichen bezeichnen, nicht des gegebenen Wirklichen. Mathematik und Wissenschaft versinken dadurch jedoch nicht in einen bloßen Formalismus, sondern nehmen in anderer Form Bezug auf Wirklichkeit. Denn die Form- und Strukturbestimmungen zielen nicht auf die Dinge, sondern auf das Gefüge der Dinge ab. In dieser Art der Bestimmung tritt die Aktivität der Zeichen, die sie von Beginn an auch in vorwissenschaftlichen Kontexten haben, in ihrer vollen Kraft hervor. Denn der Begriff, realisiert als Zeichen, ist nicht ein „gebahnter Weg [...], in dem das Denken fortschreitet, als [...] vielmehr eine Methode, ein Verfahren der Bahnung selbst [...]. In dieser Bahnung kann das Denken völlig selbständig verfahren: es bindet sich nicht an feste Zielpunkte, die im

5 „Auch diese Schemata können freilich nicht im leeren Raume des bloßen, des schlechthin ‚abstrakten‘ Denkens stehen bleiben. Sie bedürfen des Haltes und einer Stütze – aber sie entnehmen dieselbe nicht mehr einfach der empirischen Dingwelt, sondern sie schaffen sie sich selbst“ (Cassirer 1929/1990: 333).

6 Die logische Dimension des Zeichens in diesem Sinne gedacht versteht unter Begriff „mit Kant nichts anderes als die ‚Einheit der Regel‘, durch die eine Mannigfaltigkeit von Inhalten zusammengehalten und in sich selbst verknüpft wird“ (Cassirer 1929/1990: 334, 235). Allerdings erfasst der Begriff die Mannigfaltigkeiten nicht im Sinne eines Klassenbegriffes, wie er in der mengentheoretischen Konzeption der Logik angelegt war, sondern eines Funktionsbegriffes.

Gegebenen schon fertig vorliegen, sondern es stellt neue Ziele auf, und fragt, ob ein Weg und welcher Weg zu ihnen hinführt“ (Cassirer 1929/1990: 356).

Ebenso wie die „Sprache fortschreitet, als sie gleichsam ‚zu sich selbst kommt‘ [...] aus der Phase des ‚mimischen‘ und des ‚analogischen‘ Ausdrucks schreitet die Sprache zur rein symbolischen Formung fort [– wiederholt die Wissenschaft] den gleichen Weg. Auch sie gewinnt die ‚Nähe‘ zur Natur nur dadurch, daß sie auf sie verzichten lernt – daß sie sich das Gegebene in eine ideelle Ferne rückt“ (Cassirer 1929/1990: 483).⁷ Dieser rein symbolische Gebrauch der Zeichen ermöglicht es, in die Mathematik und auch in die Wissenschaft imaginäre Entitäten einzuführen, über deren Existenz und Realität seit langem diskutiert wird. Die Bedingung der tatsächlichen Konstruierbarkeit der griechischen Geometrie, die Orientierung der aristotelischen Wissenschaft am Sinnlich-Gegebenen oder die Unterordnung der rationalen Naturerkenntnis bei René Descartes unter den Raum – und später bei Immanuel Kant unter die reinen Anschauungsformen von Zeit und Raum – dienen der Verhinderung des Imaginären und der Rückbindung an die Wirklichkeit als gegenständlichen Anwendungskontext.⁸ Doch nicht alle folgen dieser Selbstbeschränkung. So löst Leibniz etwa die strenge Orientierung Descartes an der Raumform der *res extensa* als bedingender Form der Erkenntnis auf, indem er jede mögliche logische Form zulässt und somit zu imaginären Entitäten respektive zum ‚nouveau calcul des transcendentes‘ gelangt. Die Diskussion darüber, ob diese Entitäten existieren, erübrigt sich jedoch, wenn Existenz nicht substanzlogisch und in diesem Sinne anschaulich auf das Sinnlich-Gegebene hin, sondern der mathematischen Form der Objektivierung entsprechend funktionslogisch verstanden wird. Der Verlust des Anschaulichen ist, so Cassirer, für den Fortgang der mathematischen wie physikalischen Begriffsbildung notwendig, denn eine „Trennung in eigentliche und uneigentliche, in angeblich ‚reale‘ und angeblich ‚fiktive‘ Elemente [...] würde] die methodische Einheit der Mathematik zerstören“ (Cassirer 1929/1990: 468). Gerade durch das Imaginäre, oder die ‚idealen Elemente‘, wie Cassirer sie

7 Dieser Durchgang durch die symbolischen Formen im Laufe der Wissenschaftsentwicklung ist im Kontext der Simulation entscheidend, denn dadurch wird der Simulation respektive ihrer Resultate jegliche mimische Funktion der Wirklichkeit auf Basis eines naiven Bildvergleichs abgesprochen.

8 Insofern gibt Kant in der *Kritik der reinen Vernunft* weniger eine Philosophie der Mathematik, als eine Philosophie der Anwendbarkeit der Mathematik.

nennt, wird jedoch die Vereinheitlichung der Mathematik gewährleistet. Denn diese schreitet in ihrer Entwicklung insofern voran, als sie sich „dazu entschließt, einen reichen Begriff von Beziehungen, die es zuvor einzeln betrachtet und untersucht hatte, in einen geistigen Brennpunkt zu versammeln und mit einem Symbol zu bezeichnen“ (Cassirer 1929/1990: 468). Bei diesem Fortgang der Erkenntnis dringt die Mathematik notwendigerweise in Bereiche des Imaginären vor, seien es irrationale Zahlen wie π oder ε , imaginäre Größen, nicht-Euklidische Geometrien oder das Infinitesimale. Die Entwicklung des Differentialkalküls ist für Cassirer bislang die reifste Frucht dieses fortschreitenden Prozesses der mathematischen Erkenntnis in idealiter.

„Er [Differentialkalkül] hatte sich bereits auf den verschiedenen Gebieten – in der Begründung der Dynamik durch Galilei, in der Lehre von den Maxima und Minima bei Fermat, in der Theorie der unendlichen Reihen, in dem sog. ‚umgekehrten Tangentenproblem‘ usf. – betätigt, ehe er allgemein erkannt und allgemein fixiert war. Newtons Zeichen \dot{x} und Leibniz’ Zeichen: dy/dx leisten zunächst nichts anderes, als daß sie diese Fixierung vollziehen: sie bezeichnen einen gemeinsamen Richtpunkt für Untersuchungen, die zuvor auf getrennten Wegen verliefen. In dem Augenblick, als dieser Richtpunkt einmal bestimmt und in einem Symbol festgehalten war, erfolgte gleichsam eine Kristallisation der Probleme: von allen Seiten her schießen sie jetzt zu einer logisch-mathematischen Form zusammen. Abermals erweist das Symbol hier jene Kraft [...] die Kraft der Verdichtung. Es ist, als würde durch die Schöpfung des neuen Symbols eine gewaltige Energie des Denkens aus einer relativ diffusen Form in eine konzentrierte Form übergeführt. [...] Sie brauchte nur das, was in den neu geschaffenen Symbolen aufgewiesen und implizit gesetzt war, zur vollständigen expliziten Erkenntnis zu erheben“ (Cassirer 1929/1990: 468, 469).

Diese Verdichtung kraft der Symbole ist eine Form der Aktivität der Zeichen im Sinne eines ‚Verfahrens der Bahnung selbst‘. Die Verdichtung und Bahnung verläuft im rein symbolischen Umgang mit der Sprache anders als im mimischen oder analogischen. Die Bahnung erschließt neue Weisen der rein symbolischen Konstruktion wie das Differentialkalkül in seiner weiteren Ausgestaltung als Analysis des Infinitesimalen. Diese konstruktive Kraft der rein symbolisch verwendeten Zeichensysteme prädestiniert diese als symbolische Maschinen, nicht nur in der Mathematik, sondern auch in der wissenschaftlichen, insbesondere in der physikalischen Begriffsbildung. Als solche vereinheitlichen sie die verschiedenen Erkenntnisformen der Wissenschaft, sofern „Induktion“ und ‚Deduktion‘, ‚Erfahrung‘ und ‚Denken‘, ‚Experiment‘ und ‚Rechnung‘ [... sich] in der Umsetzung des Gegebenen in die Form einer rei-

nen Zahl-Mannigfaltigkeit begegnen und zusammenschließen“ (Cassirer 1929/1990: 503). Dabei nutzt die Physik respektive die Wissenschaft kein ungeordnetes System von Mannigfaltigkeiten, sondern ein geordnetes, dessen Ordnungsverhältnis sich aus dem Reihenprinzip generiert. Durch Relationen wie Beieinander, Zueinander, Aufeinanderfolgend, etc. sind verschiedene Mannigfaltigkeits-Typen generierbar. Auch hier spielt die Zahl eine herausragende Rolle, insofern sie Reihenbildungen par excellence ermöglicht, so wie im Induktionsprinzip der natürlichen Zahlen. Sofern die einzelnen, empirisch beobachteten oder gemessenen Reihenwerte durch Grenzwerte und -ideen ersetzt werden, nach welchen die empirischen Reihen konvergieren, vermag es die Wissenschaft, die theoretischen Begriffe und ihre operativen Maschinen auf die Wirklichkeit zu übertragen. Die Grenzidee des materiellen Punktes in der Mechanik oder des Kontinuums der reellen Zahlen sind ebenso Beispiele hierfür wie der starre Körper, das ideale Gas oder der vollkommene Kreisprozess (vgl. Cassirer 1929/1990: 502ff). In diesen Grenzideen und -werten liegt die bereits thematisierte Extremalisierung der mathematischen Modelle wissenschaftlicher Kontexte begründet. Sie sind notwendig, so Cassirer, um die Beobachtungen überhaupt in „mögliche Subjekte für physikalische Urteile“ zu überführen (Cassirer 1929/1990: 502).

Von der Schrift zum Computer

Cassirer unterscheidet nicht explizit zwischen gesprochener Sprache und Schrift. Wenn man jedoch den rein symbolischen Sprachgebrauch betrachtet, handelt es sich immer um die formale Manipulation von schriftbasierten Zeichen und Zeichenketten. Wenn Cassirer daher David Hilberts Ausspruch, „Am Anfang war das Zeichen“, öfter zitiert, so weist er genau auf diesen rein formalistischen Sprachumgang basierend auf Schrift hin. Insofern sieht er auch das Leibnizsche Programm der *Ars characteristica* als rein schriftzeichenbasiertes Unterfangen bei Hilbert fortgeführt. Ein solcher formalistischer Zeichenumgang kehrt den Bezug zur Wirklichkeit von einer darstellenden in eine erzeugende Funktion um. Nicht der Beschreibung, sondern dem Verfahren wird dabei das Primat eingeräumt. „Das Gesetz umfasst nicht nur eine Unendlichkeit möglicher Anwendungsfälle, sondern es läßt sie aus sich hervorgehen. Mit dieser Einsicht aber kehrt die moderne Mathematik, auf durchaus eigenen und neuen Wegen, im Grunde wieder zu dem Punkt zurück, von dem Leibniz als Methodiker des mathematischen Denkens seinen Ausgang genommen hatte. [...] In diesem Sinne betont auch Weyl, daß man, um zu einer wahrhaft sicheren und tragfähigen Grundlage der Analysis

zu gelangen, von dem reinen Verfahren der ‚Iteration‘ seinen Ausgang nehmen müsse“ (Cassirer 1929/1990: 431, 432). Damit gewinnt, epistemologisch gesehen, der Funktionsbegriff gegenüber dem Substanzbegriff den Vorrang und die Mathematik gründet sich ein weiteres Mal in der Zahl, genauer gesagt: in deren Erzeugungsverfahren. Die Iteration als Prozess des ins Unendliche möglichen Fortgangs einer Reihe bestimmt den logischen Aufbau der Mathematik. Und dieser Aufbau wird sich vor allem im Computer als Medium und in der neuen Sprache der (maschinentauglichen) Algorithmen bewähren.

Cassirers Philosophie gibt den Stand der Mathematik und der Wissenschaft bis in die 1920er Jahre wieder. Sein Interesse an der Iteration wie am Funktionsbegriff ist kein operatives, auf die tatsächliche Ausführung hin ausgerichtetes, sondern – entsprechend den Möglichkeiten des beginnenden 20. Jahrhunderts – ein logisches, das nach den Formalismen der Verfahren fragt. Noch bewegen sich Mathematik und Wissenschaft mit ihren Symbolmanipulationen auf der Oberfläche des Papiers und damit im Rahmen der analytischen Handhabung der Formalismen. Dabei nutzen sie die Verdichtung als maßgebliche Kraft der Symbole.

Ein auf sich selbst bezogener Symbolumgang entfaltet jedoch eine neue Kraft: Operativität. Für diese operative Kraft der Symbole bedarf es jedoch eines anderen Mediums als des Papiers. Vielmehr wird ein dynamisches und offenes Medium benötigt. Während die Verdichtung die Begrenzung der Fläche nutzt, um anstelle der „Sukzession der Denkschritte [...] eine reine Simultanität des Überblicks“ zu geben, wie durch „die Fortbildung der Technik und Methodik des mathematischen Beweises durch Leibniz“ (Cassirer 1929/1990: 453), so genügt dies nicht für die Operativität.⁹ Das Blatt Papier als Ort der Simultanität des Überblicks und der Beweis respektive die Deduktion als das primäre Operationsverfahren im Sinne der Verdichtung auf der Oberfläche dieses stati-

9 „Es läßt sich auch rein geschichtlich verfolgen, wie Descartes’ Skepsis gegen die Sicherheit des deduktiven Verfahrens die eigentlich bewegende und treibende Kraft für Leibniz’ ‚Beweistheorie‘ geworden ist. Soll der mathematische Beweis wahrhaft stringent sein, soll ihm wirkliche Überzeugungskraft innewohnen, so muß er aus der Sphäre der bloßen Erinnerungs-Gewißheit gelöst und über sie hinausgehoben werden. [...] Nur das symbolische Denken vermag diese Leistung zu vollbringen. Denn die Natur desselben besteht eben darin, daß es nicht mit den Denkinhalten selber operiert, sondern jedem Denkinhalt ein bestimmtes Zeichen zuordnet, und daß kraft dieser Zuordnung eine Verdichtung erreicht wird, durch welche es möglich wird, alle Glieder einer komplexen Beweiskette in eine einzige Formel zu konzentrieren, und sie mit einem Blick, als eine gegliederte Gesamtheit, zu umfassen“ (Cassirer 1929/1990: 453, 454)

schen Mediums wird durch die Operativität gesprengt. Operativität, die in der Regel an das rekursive Erzeugungsverfahren der Zahl gekoppelt ist, überwindet die limitierende und statische Fläche des Papiers in mehrfacher Weise: In Form des numerischen Ausrechnens fällt die Operativität in zwei Teile, zum einen in die Erstellung eines Schemas (Berechnungsplan) und zum anderen in die Ausführung dieses Schemas (Berechnung).¹⁰ Darüber hinaus beschränkt sie sich – im Unterschied zur rein symbolischen Umformung der Deduktion – nicht auf das Papier, sondern bricht immer wieder aus, sofern prozessuale Instrumente wie Zirkel, Rechenschieber oder mechanische Rechenmaschinen zum Einsatz kommen. In diesem Sinne bringt die Operativität eine anders gelagerte Kraft der symbolischen Form als die Verdichtung hervor. Sie buchstabiert sozusagen die verdichteten Formalismen aus und entfaltet diese in nahezu unendlich viele Einzelzeichen. Der ungemein denkökonomische Ansatz der Verdichtung wird konterkariert und pures Berechnen respektive Simulieren gilt manchen Mathematikern daher als intellektuell anspruchslos (vgl. Ulam 1980).

Doch was bedeutet es, Verdichtung in Operativität zu transformieren und die Formalismen auszubuchstabieren? Die Operativität nimmt hier einen anderen Weg als die Verdichtung. Nicht die Deduktion oder der Beweis stellen den Kern des operativen Verfahrens dar, sondern die prozessuale Planung und Berechnung. Durch diesen Vorgang enthüllt die operative Kraft der Symbole die instrumentale oder technische Seite der Sprache, die nicht nur ein Darstellungsmittel des Denkens im Begriff, sondern des Erfassens im Sinne eines Wirkens ist. In diesem Wirken betätigt sich die Sprache produktiv. Daher spricht Sybille Krämer von den operativen Verfahren der formalen Zeichensysteme als ‚symbolische Maschinen‘ und Cassirer vom ‚Werkzeug des Geistes‘ (vgl. Krämer 1988, 1990; Cassirer 1930/2004), ohne jedoch die Entfaltung der operativen Kraft dieser Maschinen oder Werkzeuge in ihrer technischen Dimension zu untersuchen. Die Logik des Instrumentalen liegt nicht in der Verdichtung und Komprimierung, sondern – wenn man Heidegger folgen will – im Her-vor-bringen aus der Verborgenheit im Sinne eines Entbergens. Dieses Entbergen ist jedoch im Falle der symbolischen Maschinen nicht auf eine sinnlich-gegebene Wirklichkeit bezogen wie im Falle der materialen Technik, sondern auf den verdichteten Formalismus. „Das Entscheidende der τέχνη [techné] liegt somit keineswegs im Handeln und Hantieren, nicht im Verwenden von Mitteln, sondern in

10 Hier ist natürlich nicht von einfachen mathematischen Operationen wie der Addition, sondern von der Lösung komplexer Funktionen die Rede.

dem genannten Entbergen. Als dieses, nicht aber als Verfertigen, ist die τέχνη ein Her-vor-bringen“ (Heidegger 1949/1962: 13). Heidegger nimmt in seinem Artikel *Die Frage nach der Technik* vor allem auf energiefördernde Technologien als Formen moderner Technik Bezug und differenziert daher die Entbergung weiter als Herausforderung durch das Auf- und Erschließen der verschiedenen Energien, durch Umformung, Speicherung, Verteilung und Umschaltung (vgl. Heidegger 1949/1962).¹¹ Die Technik steht hier keineswegs im Kontrast zur Naturwissenschaft, insbesondere der Physik. Denn nach Heidegger zeigt sich diese Art des technischen Entbergens bereits in der neuzeitlichen, exakten Naturwissenschaft, in ihrer Art des Vorstellens der Natur „als einen berechenbaren Kräftezusammenhang“ (Heidegger 1949/1962: 21).

„Die neuzeitliche Physik ist nicht deshalb Experimentalphysik, weil sie Apparaturen zur Befragung der Natur ansetzt, sondern umgekehrt: weil die Physik, und zwar schon als reine Theorie, die Natur daraufhin stellt, sich als einen vorausberechenbaren Zusammenhang von Kräften darzustellen, deshalb wird das Experiment bestellt, nämlich zur Befragung, ob sich die so gestellte Natur und wie sie sich meldet“ (Heidegger 1949/1962: 21). Die Physik ist die Wegbereiterin des Wesens der Technik. „Darum kann die Physik bei allem Rückzug aus dem bis vor kurzem allein maßgebenden, nur den Gegenständen zugewandten Vorstellen auf eines niemals verzichten: daß sich die Natur in irgendeiner rechnerisch feststellbaren Weise meldet und als ein System von Informationen bestellbar bleibt“ (Heidegger 1949/1962: 22).

Ähnlich Cassirer sieht Heidegger das Umkehrverhältnis von Wissenschaft und Wirklichkeit in der Berechnung beziehungsweise in der spezifischen symbolischen Form der Wissenschaft begründet. Interessant ist nun an Cassirers Charakterisierung des Symbolischen und an Heideggers Charakterisierung des Technischen, insbesondere der energiefördernden Techniken, dass hier etwas konvergiert, das in der Erfindung des Computers seinen Ausdruck findet. Durch das Zusammentreffen von Symbol und Energie wird nicht nur ein neues Medium geschaffen, sondern eine neue symbolische Form der Forschung. Um die operative Kraft des rein symbolischen Sprachgebrauchs tatsächlich zur Wirkung zu bringen, bedarf es eines Aktes der Entbergung besonderer Art. Dieser Akt des Entbergens besteht in der technischen Erschließung des Instrumentalen der Sprache durch die Umsetzung ihrer operativen Kraft in die

11 „Dies geschieht dadurch, daß die in der Natur verborgene Energie aufgeschlossen, das Erschlossene umgeformt, das Umgeformte gespeichert, das Gespeicherte wieder verteilt und das Verteilte erneut umgeschaltet wird. Erschließen, umformen, speichern, verteilen, umschalten sind Weisen des Entbergens“ (Heidegger 1949/1962: 16).

tatsächliche Operativität des Prozesses. Indem die Fluidität der Energie derart erschlossen, umgeformt, gespeichert, verteilt und umgeschaltet wird, dass dadurch die Sukzession der Reihung in der Zeit implementierbar wird, lässt sich die Operativität der symbolischen Maschinen technisch realisieren. Daher ist der Computer eine Maschine, die nicht den Raum, sondern die Zeit technisch bestellt und erst dadurch das Instrumentale der Sprache als Wirkung, also technisch, erschließen kann.

Dies hat grundlegende Folgen für den Umgang mit Mathematik. Solange Mathematik im Raum, sprich auf dem Papier operiert, ist das „mathematische ‚Tun‘[...] ein rein intellektuelles Tun, das nicht in der Zeit verläuft, sondern das ein Grundmoment, auf dem die Zeit selbst beruht, das Moment der ‚Reihung‘, erst selbst ermöglicht“ (Cassirer 1929/1990: 433). Doch während das mathematische Tun auf dem Papier die Reihung nicht in ein empirisches Nacheinander zerlegt, sondern gerade mit dem Grundmoment der Zeit symbolisch hantiert, zerlegt der Computer – durch das Ausbuchstabieren dieses Prinzips in der Zeit als eine tatsächlich hergestellte Sukzession – die Reihung. Da die Reihung die Grundoperation ist, auf der das Reich der Zahlen basiert, kann ein Computer nur ein Rechner sein. Er bedarf insofern einer rechnenden Version der Logik, wie sie in der Booleschen Algebra gegeben ist, um die Zeit zu bestellen. Mit dieser Art der Bestellung des Zeitlichen verschmelzen im Computer die symbolischen Maschinen mit der energieverarbeitenden Maschine und bilden das gesuchte Medium zur Entfaltung der operativen Kraft des rein symbolischen Sprachgebrauchs in seiner technischen Dimension. Die Werkzeuge des Geistes werden zu tatsächlich realisierten Werkzeugen.

Entlang dieser Verschmelzungslinie vollzieht sich der bereits angesprochene Perspektivwechsel, der ein neues mathematisches Tun verlangt, wie es sich in den maschinentauglichen Algorithmen als neue Sprache, in den codierten Modellen der Rechenvorschrift und schließlich in der Simulation zeigt. Daher stellt der Computer nicht nur eine notwendige Bedingung der Simulation respektive der Computerexperimente dar, sondern ein neues Prinzip, das zwar als Berechnung per Hand auf der Oberfläche des Papiers ‚simuliert‘ werden kann, das aber erst im Computer zur Realisierung kommt. Denn die tatsächlich hergestellte Sukzession der Reihung darf man sich nicht wie das Aufschreiben von Zahlenreihen auf dem Papier vorstellen. Auf der Fläche des Papiers ist das Aufschreiben nur als ein nacheinander Hinschreiben der einzelnen Werte einer Reihe denkbar. Im Computer verläuft die Sukzession hingegen als Überschreibung ganz im Sinne des Operationsverfahrens der Iteration respektive Rekursion. Der aus dem vorherigen Wert errechnete

Wert überschreibt diesen und dient zur Berechnung des nächsten Wertes usf. bis der Prozess an das Ende kommt oder angehalten werden muss. In dieser Form der Überschreibung entfaltet die Sukzession in der Zeit die Entwicklung eines Zahlenwertes aus sich selbst gemäß der Anweisung des Formalismus.¹²

Experimentalisierung der Mathematik

Die Frage, die sich aus diesem Medienwechsel – der auch ein Wechsel vom Raum in die Zeit ist – ergibt, lautet: Welche Folgen hat dies für die Mathematik? Dass sich das mathematische Tun verändert, wurde bereits angedeutet. Es geht über das rein intellektuelle Tun hinaus und eröffnet einen neuen Handlungsraum. Dieser neue Handlungsraum konstituiert sich aus der technischen Erschließung der Operativität des Symbolischen und zeigt sich im Entbergen der in den verdichteten Formalismen enthaltenen Reihungen (Trajektorien). In genau diesem Sinne ermöglicht der Computer den dritten Typus der empirischen Extension, der auf die sinnliche, unvermittelte Wahrnehmung und ihre technische Erschließung durch Beobachtungs- und Messinstrumente folgt. Allerdings erschließt dieser dritte Typus nicht die sinnliche Wahrnehmung, sondern die mathematische Anschauung. Bereits Edmund Husserl nannte die automatisierte Extrapolation eine „völlig neuartige induktive Voraussicht“ (Husserl 1935/1996: 33). Die Frage, welche Folgen dies für die Mathematik hat, lässt sich daher in die Frage umformen: Welches mathematische Tun entspricht dem Forschen basierend auf dem dritten Typus der empirischen Extension, also im Möglichkeitsraum des Computers? Die Antwort ergibt sich aus den Folgen der technischen Erschließung. Diese geht nämlich mit zwei neuen Eigenschaften einher: der Sichtbarmachung und der Experimentalisierung. Machte die technische Erschließung der Wahrnehmung, basierend auf instrumentenvermittelnder Einsicht, das bislang Nichtwahrnehmbare sichtbar und damit den neuen Wahrnehmungsbereich experimentell zugänglich, so ermöglicht der dritte Typus der empirischen Extension den Einblick in das bislang mathematisch Unanschauliche und macht es dadurch experimentell zugänglich. Aufgrund der besonderen symbolischen Prägung der mathemati-

12 Dieser Unterschied zwischen dem Aufschreiben auf Papier, also im Räumlichen, und dem Überschreiben im Computer, also im Zeitlichen, markiert den entscheidenden Unterschied zwischen beiden Medien. Da der Computer ein fluides Medium ist, entspricht das permanente Überschreiben seiner fluiden Logik mehr, als das statische Speichern eines Zustandes (vgl. Gramelsberger 2001).

schen Anschauung und der spezifischen Kraft der Operativität des Symbolischen geht die Experimentalisierung, basierend auf Operativität, der Sichtbarmachung voraus. Die primäre Folge der Technisierung der operativen Kraft der mathematischen Symbolsysteme ist daher die Experimentalisierung der Mathematik selbst.¹³ Die Mathematik wird dabei aus dem strengen Regelkanon der reinen Mathematik herausgelöst und den Bedingungen dieses dritten Typus der empirischen Extension unterworfen, der dem Prinzip der Stetigkeit folgt. In diesem Sinne könnte man sogar weiter folgern, dass die Mathematik durch den Computer zu einer empirischen Wissenschaft wird, deren maßgebliche Untersuchungsmethode das Experimentelle ist. Allerdings darf der Begriff des Empirischen hier nicht mimisch oder anschaulich auf das Sinnlich-Gegebene gerichtet verstanden werden, sondern funktionslogisch im Sinne der Umkehrung des Blicks als neuer geistiger Perspektive auf das Sinnlich-Gegebene, wie von Cassirer für die symbolische Form der Wissenschaft rekonstruiert; als Durchblick ins Innere der symbolisch rekonstruierten Phänomene.

In dem Moment, in dem das Experimentelle zur dominanten Form des mathematischen Tuns avanciert, konstituiert der Computer als Computerlabor – analog dem Experimentallabor – den Ort, um das symbolische Instrumentarium und damit die Objekte der Mathematik zum experimentellen Untersuchungsgegenstand zu machen. Er tut dies, indem er die Objekte der Mathematik in der Zeit zur Wirkung bringt. Das Computerlabor unterscheidet sich vom klassischen Experimentallabor vor allem in einem Punkt: die Gegenstände, mit welchen hantiert wird, sind nicht materialer, sondern rein symbolischer Natur. Im Computerlabor werden die technologisch-epistemischen Texturen der Wissenschaft selbst zum Gegenstand der Forschung, sofern diese mathematisch formulierbar sind.¹⁴ Aber ebenso wie im Experimentallabor geht es um die Entde-

13 Zwar zeigt sich dieser experimentelle Charakter bereits vor der Einführung der Computer in der numerischen Erforschung der symbolischen Maschinen auf dem Papier. Doch wird hier das Experimentelle nur simuliert, insofern das nötige Experimentallabor (Computer als Zeitmedium) und mit ihm die entsprechenden Experimentalsysteme (Modelle der Rechenvorschriften) und Experimente (Computerexperimente) noch fehlen. Erst in der Verschmelzung von Symbol und Energie ist die Voraussetzung für die Experimentalisierung der Mathematik geschaffen.

14 Nicht alles lässt sich mathematisch darstellen, da es entweder an einem geeigneten mathematischen Instrumentarium fehlt oder sich die Theorie grundsätzlich der Mathematisierung entzieht. Beispielsweise basierte der Erfolg der Quantenmechanik auf der Entwicklung eines geeigneten mathematischen Instrumentariums und neuer mathematischer Objekte, während sich die Sozialökonomie einer durchgängigen Mathematisierung ent-

ckung von Neuem. Doch was ist das Neue der experimentellen Entdeckung und welche Art des Forschens steht dahinter?

„Ein Kennzeichen von Laboratorien ist,“ schreibt Karin Knorr Cetina in ihrer Studie über die *Fabrikation von Erkenntnis*, „daß sie eine Rekonfiguration des Systems der ‚Selbst-Anderen Dinge‘ implizieren, eine Rekonfiguration des ‚Phänomenfeldes‘, in dem Erfahrung in der Wissenschaft erzielt wird. Die beiden genannten Begriffe sind von Merleau-Ponty entlehnt, der mit dem System der ‚Moi-Autruil-les choses‘ nicht die objektive Welt unabhängig von menschlichen Akteuren und auch nicht die innere Welt subjektiver Eindrücke meint, sondern die Welt-bezogen-auf-Akteure. Die Laborstudien legen nahe, daß das Labor ein Mittel ist, um die Welt-bezogen-auf-Akteure so zu verändern, daß die Symmetrie zwischen Wissenschaftlern und Objektwelt zugunsten der ersteren verändert wird“ (Knorr Cetina 2001: XIV).¹⁵

Diese Rekonfigurationen des Phänomenfeldes führen in mühevoller Forschungsarbeit zu Entdeckungen. Allerdings ist hier der Begriff des Entdeckens konstruktiv zu verstehen. „„Gab es denn“, lässt Bruno Latour in seiner Studie über *Pasteur und seine Milchsäurefermente* fragen, „nicht schon Fermente, bevor Pasteur sie gestaltete?“. [...] Und die Antwort kann nur lauten: ‚Nein, sie existierten nicht, bevor er daherkam‘“ (Latour 2002: 175). Man könnte behaupten, Fermente hätten schon immer existiert, bevor sie von „Pasteur mit seinem durchdringenden Blick ‚entdeckt‘“ wurden (Latour 2002: 175). Doch Experimentieren bedeutet, Verschiebungen in einem permanenten Prozess des Differenzierens, des (Re-)Arrangierens, des Konkretisierens flüchtiger Spuren zu erzeugen. Im Laufe eines solchen Prozesses konfigurieren sich die Wissensbestände des Forschers und die Gestaltung der Experimentalsysteme laufend neu und bewegen sich schließlich auf die Entdeckung hin, die am Ende und nicht am Beginn der Forschung steht. In diesem Sinne meint Entdecken das sich Herausschälen einer neuen Entität durch das Wechselspiel von Vagheiten und Stabilisierungen, von epistemischen und technischen Dingen. Daher braucht Experimentieren Geschick und Meisterschaft. Geschick im Sinne von erfolgreich auf den Weg bringen, wie Heidegger

zieht: „Ein so verstandenes [mathematisiertes] Forschungsprogramm läuft zwangsläufig darauf hinaus, alles nicht-mathematisierbare Verhalten aus dem Untersuchungshorizont auszuschließen. Was mathematisch nicht auszudrücken ist, wird a priori als Verhaltensanomalie im Sinne von nicht-rational postuliert“ (Rolle 2005: 144, 145)

15 Karin Knorr Cetina bezieht sich hier auf Maurice Merleau-Pontys 1945 erschienenes Werk *Phénoménologie de la perception* (vgl. Merleau-Ponty 1945).

es auch für das Instrumentelle als Entbergen und Bestellen darlegte.¹⁶ Denn experimentelle Forschung ist ein komplexes, epistemisches Unterfangen, das sich seinen Weg in „verwickelten Gebieten [suchen muss], wo es darauf ankommt, erst sehen und fragen zu lernen“ (Fleck 1935/1994: 111).¹⁷ Aus dieser Perspektive entpuppt sich Forschung als kreativer Prozess, dessen Wissenschaftlichkeit durch das Diktum „größter Denkwang bei kleinster Denkwillkürlichkeit“ (Fleck 1935/1994: 124) garantiert wird, dessen Natur aber mehr im Handwerk des Forschens, als in der Abbildung von Welt zu suchen ist. Der Grund dafür liegt auf der Hand: Wirklichkeit eins zu eins abzubilden würde wenig Erkenntnisgewinn bringen. Es sind die Hinzufügungen und Weglassungen, die Perspektivität, die Art der Übersetzungen und Transformationen, die Wissen aus der Differenzialität zur Wirklichkeit erzeugen. Forscher setzen dazu die Kulturtechniken der Schrift, des Bildes und der Apparate in einem bestimmten Modus der Re-Kontextualisierung ein. Sie nutzen diese als Werkzeuge zum Operieren mit vorläufigen Gegenständen (epistemischen Objekten), die es im weiteren Fortgang der Forschung zu stabilisieren gilt. Dieser Forschungsprozess kann sich über viele Jahre hinziehen, bis es zu einer Entdeckung kommt. Er kann aber auch scheitern.

Im Computerlabor treffen nun der operative Modus der Re-Kontextualisierungen der experimentellen Forschung und die technische Erschließung der Operativität des Symbolischen der Mathematik aufeinander. Allerdings unterliegt das Handwerk der Fabrikation von Wirklichkeit im klassischen Experimentallabor Bedingungen, die nur in modifizierter Weise auf das Computerlabor übertragen werden können: Forschung im

16 „Das Wesen der modernen Technik bringt den Menschen auf den Weg jenes Entbergens, wodurch das Wirkliche überall, mehr oder weniger vernehmlich, zum Bestand wird. Auf einen Weg bringen – dies heißt in unserer Sprache: schicken. Wir nennen jenes versammelnde Schicken, das den Menschen erst auf einen Weg des Entbergens bringt, das Geschick“ (Heidegger 1949/1962: 24). Forschung als experimentelle Forschung wie auch Computerexperimente sind unter der Perspektive des Technischen und des Geschicks im herkömmlichen wie in Heideggers Wortsinn zu betrachten. Daher ist auch Mary Morgans bereits angesprochene Definition der Simulation als Technologie sehr zutreffend (vgl. Morgan 2004).

17 „Es besteht ein sehr verbreiteter Mythos über Beobachtung und Experiment. Das erkennende Subjekt figuriert als eine Art Eroberer vom Typus Julius Cäsars, der nach der Formel *veni-vidi-vici* seine Schlacht gewinnt. Man will etwas wissen, man macht die Beobachtung oder das Experiment – und schon weiß man es. Selbst Forscher, die manche Kämpfe gewannen, glauben dieses naive Märchen, wenn sie retrospektiv ihre eigene Arbeit betrachten“ (Fleck 1935/1994: 111).

Experimentallabor ist dem Zwang der Wirklichkeit untergeordnet, dessen Berücksichtigung ein maßgeblicher Teil der Forschung ist. Daher gehören materiale Widerständigkeit und experimentelles Scheitern prinzipiell zur experimentellen Wissenskultur. Dieses Forschungshandeln in der Wirklichkeit erhebt den Anspruch, Fakten von Fiktionen unterscheiden zu können. Andererseits sorgt es dafür, dass Forschung im Experimentallabor in theoretisch unterdeterminierten Räumen stattfindet und macht die experimentelle Forschung zu einem mühsamen und langwierigen Geschäft. Forschungshandeln im Computerlabor hingegen unterliegt anderen Bedingungen. Der für die Forschung entscheidende Evidenzanspruch des materialen Zwangs löst sich auf, wenn Wissenschaftler mit rein symbolischen Objekten respektive technologisch-epistemischen Texturen hantieren. Dies eröffnet für die Wissenschaft das problematische Terrain zwischen Fakt und Fiktion. Der symbolische Charakter der experimentellen Forschung kann nicht wie im klassischen Experimentallabor auf materiale Widerständigkeit und materiale Wiederholbarkeit als Korrektiv hoffen. Hier liegt die Crux der Computereperimente: Sie agieren zwar in einem theoretisch überdeterminierten Experimentalraum, dieser bietet jedoch keinerlei Korrektiv in seiner experimentellen Anordnung, weder als materiales Korrektiv, noch als logisches basierend auf der Kohärenz des deduktiven Verfahrens.¹⁸ Doch ähnlich wie mit dem Laxschen Äquivalenzsatz behilft sich hier die computereperimentelle Forschung praktisch, indem sie den theoretisch überdeterminierten Experimentalraum nicht als Theorieraum, sondern als einen Möglichkeitsraum betrachtet und ihn als solchen zum Gegenstand der experimentellen Forschung macht. Denn analog zum Wirklichkeitsraum des Experimentallabors ist im Möglichkeitsraum bereits alles Entdeckbare enthalten. Das Entdeckbare muss im Laufe der experimentellen Forschung herausgeschält und stabilisiert werden im Sinne des Entbergens als Her-vor-bringen. Durch diesen Wechsel vom Theorie- zum Möglichkeitsraum wird computereperimentelle Forschung überhaupt erst zur Forschung, denn ein wesentliches Kriterium von Forschung ist die Herstellung von Zukunft, wie dies bislang den Experimentallaboren vorbehalten war. „Forschung [...] produziert Zukunft: Differenz ist für sie konstitutiv. Technische Konstruktionen sind im Prinzip darauf angelegt, Gegenwart zu sichern. Für sie ist Identität in der Ausführung konstitutiv, sonst könnten sie ihren Zweck nicht erfüllen. Wenn der Impuls der Wissenschaft sich zur Technologie verfestigt, ge-

18 Auch das logische Korrektiv der Analytik fehlt, da die strukturelle Isomorphie zwischen mathematischem Modell und dem Modell seiner Rechenvorschrift nicht eindeutig beweisbar ist und die Simulationen hochgradig sensitiv gegenüber ihren numerischen Explizierungen sind.

hen wir ‚von der Zukunft zur erstreckten Gegenwart‘ über. Technische Gegenstände haben mindestens die Zwecke zu erfüllen, für die sie gebaut worden sind; sie sind in erster Linie Maschinen, die Antwort geben sollen. Ein epistemisches Objekt hingegen ist in erster Linie eine Maschine, die Fragen aufwirft“ (Rheinberger 2002: 29).

Insofern vollzieht sich auch im Computerlabor der permanente Wechsel von einer Antwort- zu einer Fragemaschine, von einem technischen zu einem epistemischen Forschungshandeln (vgl. Rheinberger 2002; Merz 2002). Dieser Wechsel zeigt sich im kontinuierlichen Wechselspiel zwischen Programmierung und Simulation im Laufe des Fortgangs der computerexperimentellen Forschung, wie am Beispiel der Vulkanparametrisierung dargestellt. Dieser Wechsel von einer Antwort- zu einer Fragemaschine gibt auch eine Antwort auf die Frage nach dem ambivalenten Status von Simulationen. Denn sofern der Experimentalraum nicht als Theorieraum, sondern als ein Möglichkeitsraum gehandhabt wird, stehen der experimentelle Charakter und die epistemischen Interessen in Form von Fragen im Vordergrund. Insofern der Möglichkeitsraum als Theorieraum gehandhabt wird – beispielsweise wenn analog zur hypothetisch-deduktiven Forschungslogik die Simulation als Antwortmaschine im Sinne von Prognosen zur Prüfung an Messdaten verwendet wird – stehen der theoretische Charakter und die technischen Interessen als Produzieren von Antworten im Vordergrund. In-silico Experimentalsysteme und Computerexperimente erlauben also beides, und sie erlauben es gleichzeitig.

Je nachdem, ob der Fokus eher auf das Theoretische oder dass Experimentelle gerichtet ist, generiert computerexperimentelle Forschung Erkenntnisse mit unterschiedlichen Evidenzansprüchen. Dies bedeutet, dass es mindestens zwei Arten von Korrektiven für Simulationsresultate geben muss. Das erste Korrektiv ergibt sich aus dem klassischen Überprüfungskriterium für Theorien im Sinne Karl Poppers, falls sich aus der Simulation eine Prognose ableiten lässt, die dann anhand von Messdaten bestätigt oder widerlegt werden kann. Diese Art von Korrektiv kann sich immer nur auf Einzelaussagen beziehen und wird zur Evaluation eines spezifischen in-silico Experimentalsystems verwendet. Beispielsweise wenn ein Klimamodell mit Messdaten aus vorindustrieller Zeit gestartet wird und es gelingt, den aktuellen Zustand des Klimas wiederzugeben bzw. signifikante Messungen darzustellen. Doch diese Art der überprüfbaren Prognose sichert nur den Evidenzanspruch des jeweiligen Computerexperiments als Artikulation eines spezifischen Theoriebaukastens unter den gewählten Bedingungen. Indem die Anfangsbedingungen leicht variiert werden (Ensemble-Prognosen) beziehungsweise mehrere

Experimentalsysteme unter standardisierten Bedingungen miteinander verglichen werden (Modellvergleich), versucht man die Prognosegüte einzelner Experimente auf das gesamte Experimentalsystem zu übertragen, um hinreichend gute Antwortmaschinen für Zukunftsprojektionen zu erhalten. Diese Übertragung ist, wie bereits diskutiert, nur bedingt möglich und nur unter Wahrscheinlichkeitsannahmen, welche die klassischen Fehlerbalken ersetzen.¹⁹

Die zweite Art sind computerexperimentelle Korrektive. Der Konvergenztest als mathematisches Korrektiv ist hier ebenso zu verbuchen wie das informatische Korrektiv, das ein in-silico Experimentalsystem zuverlässig laufen muss und nicht abstürzen darf.²⁰ Der maßgebliche Erkenntnisgewinn besteht jedoch nicht darin, dass ein in-silico Experimentalsystem ein beliebig bestückter Theoriebaukasten ist, sondern dass es eine bestimmte Kombination von Theorieteilen darstellt. Diese Theorieteile, die zuvor in der Forschung für sich alleine standen, kommen erstmalig im in-silico Experimentalsystem zusammen. Im permanenten Wechselspiel zwischen Programmierung und Simulation wird das Zusammenspiel der Theorieteile hergestellt und hierin liegt der maßgebliche Erkenntnisfaktor der Computerexperimente begründet. Dabei wechselt computerbasierte Forschung zwischen Frage- und Antwortmaschine, zwischen epistemischen und prognostischen Korrekturen hin und her.²¹ Dieses Wechselspiel programmiert das Experimentalsystem permanent neu, erprobt es und konfiguriert das Phänomenfeld, analog zum Experimentallabor, kontinuierlich um. Allerdings verändert sich im Computerlabor dabei nicht die Objektwelt-, sondern die Theorieworld-bezogen-auf-Akteure zugunsten der Akteure. Durch diese Umkonfigurationen erneuern sich die computablen Wissensbestände der Forscher, weil die Erprobung von Kombinationen von bisher singulären Theorieteilen neue Instanziierung der Theorie darstellen und daher neue Einsichten generieren. Dabei schälen sich auch die Objekte heraus, die Zukunft in Form

19 Diese Projektionsmöglichkeit in die Zukunft ist neu. Im Unterschied zu Laborexperimenten, die Zukunft in Form neuer Entitäten herstellen können, ist dieser Blick in die Zukunft der computerexperimentellen Forschung vorbehalten.

20 „Irgendetwas in der Konvektion streikt und es ist ein richtiger Modell-crash. Das Modell steigt richtig aus“ (Interview 25, 2008).

21 Als epistemisches Korrektiv sind Einsichten zu bewerten, die den Erfahrungen der Forscher widersprechen, beispielsweise während der Vulkanparametrisierung: „Man kann viel direkter sehen, was passiert. Mit diesem Boxmodell haben wir dann auch erkannt, dass etwas nicht richtig funktionierte, dass ein physikalischer Prozess überhaupt nicht angesprochen wurde, weil wir außerhalb des Gültigkeitsbereiches waren“ (Interview 25, 2008). Als prognostisches Korrektiv wäre die Evaluierung anhand des Pinatubo-Ausbruchs von 2001 zu werten.

neuer Entitäten herstellen und das Arbeiten mit Computerexperimenten zur Forschung werden lassen.

Doch was sind das für Objekte? Es sind sicherlich keine materialen Entitäten wie Fermente (vgl. Latour 2002), aber es sind symbolische Entitäten, die Herstellungsanleitungen für neue Objekte im Wirklichkeitsraum der Labore sind. Computerexperimente basieren auf der technischen Erschließung der symbolischen Operativität. Sie nutzen diese technisch für automatisierte Extrapolationen von Prognosen. Sie nutzen diese aber auch epistemisch, indem mit ihnen der aktuelle Möglichkeitsraum erforscht wird. Dabei bahnt sich eine neue Art von Forschung ihren Weg, ausgehend von den überdeterminierten Theorieräumen, über den Computer, in den Wirklichkeitsraum der Labore. Dieser Transfer kann nur deshalb gelingen, da auch der Wirklichkeitsraum der Labore nur noch wenig mit der alltäglichen Lebenswelt zu tun hat, sondern selbst ein hochgradig technisch erschlossenes Terrain ist.²² In diesem Transfer zeigt sich für die Computerexperimente vor allem die zweite Eigenschaft der technischen Erschließung der mathematischen Anschauung, die der Experimentalisierung nachgelagert ist: die Sichtbarmachung des bislang mathematisch Unanschaulichen. Sichtbarmachung in erster Linie verstanden als Handhabbarmachung. Diese neue Art von Forschung reicht dabei über das Computer- und das Experimentallabor hinaus und erzeugt Sinnverschiebungen in unserem alltäglichen Verständnis von Lebenswelt.

Sinnverschiebungen

Sinnverschiebungen ergeben sich, so Edmund Husserl in seinem *Krisis* Vortrag von 1935, aus den Entwicklungen der Mathematik. Durch die Etablierung der mathematisierten Wissenschaften werden diese Sinnverschiebungen als universaler Kausalstil in unser Verständnis der Lebenswelt als Apriori einprogrammiert.²³ Beispielsweise als Idee der Objekti-

22 Aus dieser technischen Erschlossenheit des Wirklichkeitsraumes im Experimentallabor als Labor-Realitäten resultiert nicht nur die Differenz zum lebensweltlichen Wirklichkeitsraum. Diese Erschlossenheit macht Forschung und Entdeckungen im Sinne von Entbergen als Her-vor-bringen erst möglich. Die Bedingungen, welchen die Labor-Realitäten unterliegen, sind als apriorisch technische den Bedingungen im Computerlabor ähnlich. Daher ist der Transfer zwischen beiden möglich.

23 Das Eindringen dieses Kausalstils ist der co-evolutionäre Prozess von Wissenschaft und Gesellschaft, den Günther Frederichs als das „physikalische Weltbild [...] das zum] Weltbild dieser Gesellschaft“ geworden ist, beschreibt (Frederichs 1999: 21).

vierbarkeit und Exaktheit von Welt durch die mathematische Idealisierung der Körperwelt, die „ex datis“, so Husserl, konstruierbar ist, als die Möglichkeit der indirekten Mathematisierbarkeit der Fülle sinnlich wahrnehmbarer Entitäten, oder als die ideale Praxis der „Limes-Gestalten“, die nicht nur die Idee der Unendlichkeit sowie der Approximation in die Wissenschaften einführt, sondern auch den unendlichen Progress des Forschens motiviert. Was dieser universale Kausalstil praktisch leistet, ist nicht weniger als „eine ins Unendliche erweiterte Voraussicht“ (Husserl 1935/1996: 54), die durch Berechnung möglich wird: „Vermöge der reinen Mathematik und praktischen Meßkunst kann man für alles dergleichen Extensionale an der Körperwelt eine völlig neuartige induktive Voraussicht schaffen, nämlich man kann von jeweils gegebenen und gemessenen Gestaltvorkommnissen aus unbekannte und direkter Messung nie zugängliche [Gestaltvorkommnisse] in zwingender Notwendigkeit berechnen“ (Husserl 1935/1996: 33). Diese ‚neuartige induktive Voraussicht‘ konstituiert den dritten Typus der empirischen Extension und generiert damit die Voraussetzung für einen neuen Typus von Forschung. Die Simulation als Limes-Gestalt und angewandte Voraussicht par excellence ermöglicht es den Naturwissenschaften, rationale Extrapolationen zu erstellen. Extrapolationen, nicht nur in Form von Zukunftsprojektionen wie für das Wetter oder Klima von morgen, sondern auch als Herstellungsanleitungen zur Optimierung, Veränderung und Herstellung neuer, da möglicher Objekte, beispielsweise in Form genetischer Koordinaten zukünftiger Lebewesen oder atomarer Vorschriften für zu kreierende Moleküle und Materialien. Wie ist das möglich?

Der Computer transformiert nicht nur das mathematische Tun in ein experimentelles Tun in der Zeit, sondern er verändert auch den experimentellen Modus wissenschaftlicher Re-Kontextualisierungen. Erst letzteres schafft die Voraussetzung für den neuen Typ von Forschung, der Computer- und Experimentallabor miteinander verschränkt. Denn wenn im Computerlabor mit rein symbolischen Objekten respektive technologisch-epistemischen Texturen hantiert wird, bedeutet dies, dass nicht nur mit Theorie im Sinne symbolischer Maschinen, sondern mit bestimmten Resultaten des Forschens im Experimentallabor experimentiert wird: nicht mit den materialen Objekten, aber mit den Deskriptionen, die im Laufe der Experimentalforschung herausgearbeitet wurden. Denn Forschung im Experimentallabor erzeugt beides: das materiale Objekt wie auch seine Beschreibung. Diese Beschreibung kann als Theorie aufbereitet sein, sie birgt aber zugleich eine Beschreibung des Herstellungsverfahrens in sich. Denn das noch vorläufige Objekt als epistemisches

Objekt ist nichts weiter als „eine Liste seiner Aktivitäten und Eigenschaften“, die „den Gegenstand jedes Mal umdefiniert, wenn man diese Liste um einen Eintrag erweitert; man gibt ihm [dem epistemischen Objekt] jedes Mal eine neue Gestalt.“ [...] Um in einem solchen Prozeß des operationalen Umdefinierens einzutreten, benötigt man jedoch stabile Umgebungen, die man als Experimentalbedingungen oder als technische Dinge bezeichnen kann; die epistemischen Dinge werden von ihnen eingefasst und dadurch in übergreifende Felder von epistemischen Praktiken und materiellen Wissenskulturen eingefügt“ (Rheinberger 2002: 25).²⁴ Dieser Prozess des operationalen Umdefinierens erfolgt im Labor in kleinen Schritten und unter kontrollierten Bedingungen, um lückenlose Beschreibungen der Operationen anfertigen zu können, die später als Herstellungsanleitungen dienen. Die Entdeckung besteht aus dem material erzeugten Produkt, aus der lückenlosen Beschreibung seiner Herstellung sowie der Dekodierung seiner epistemischen Verfassung in Form von Erklärung, Theorie und Prognose. Das Ziel empirischer Wissenschaft war es daher bislang, beide ontologisch differenzierten, aber über dieselbe Praktik verwobenen Resultate – sofern die Praktik des operationalen Umdefinierens sowohl Herstellungs- wie Beschreibungspraktik ist – parallel zu generieren. Entlang dieser Verwobenheit konstituiert sich der komplexe Prozess der Re-Kontextualisierung empirischer Wissenschaft als Wechselspiel von Deskription und Operation.

Dieser Modus wissenschaftlicher Re-Kontextualisierungen ändert sich nun durch den Computer grundlegend. Und zwar insofern, als der Computer nicht nur die Dekodierungen der epistemischen Verfassung materialer Objekte in Form von algorithmierter Theorie, sondern auch die lückenlosen Beschreibungsanleitungen sichtbar und experimentell handhabbar macht. Hier kommen die informatischen Bedingungen des Computerlabors zum Tragen, sofern sie die Rekonstruktion der Herstellungsverfahren und damit die technische Realisierung der operativen Kraft des Experimentellen – analog zur operativen Kraft des Symbolischen – ermöglichen. Allerdings handelt es sich um eine andere Form der Operativität, die sich nicht aus der mathematischen Rekursion ergibt, sondern aus der experimentellen Prozessualität beziehungsweise Kausalität. Denn erst die Lückenlosigkeit der Beschreibung entlang der empirischen Operationen erzeugt die wissenschaftlich nachvollziehbare ‚wenn, dann‘-Abfolge als symbolische Rekonstruktion kausaler Zusammenhänge im Experimentallabor. Diese ‚wenn, dann‘-Abfolgen werden nun durch die Algorithmen in den ‚do (if ... then ... else ... end

24 Hans-Jörg Rheinberger zitiert hier Bruno Latours Konzept der Liste aus dessen Laborstudie *Science in Action* (vgl. Latour 1987: 87ff).

if)ⁿ end do, return'-Abfolgen rekonstruierbar. Daher ist der Computer nicht nur in hochgradig mathematisierten Kontexten wie der Physik als Computerlabor einsetzbar, sondern in der Domäne jeglicher experimentellen Forschung, insofern diese ‚wenn, dann‘-Abfolgen deskriptiv erzeugt. Ebenso wie mit dem Computer die automatisierte Extrapolation der Rekursion als ins Unendliche erweiterte Voraussicht möglich ist, wird auch die Extrapolation der kausalen Abfolgen als ins Unendliche erweiterte Voraussicht möglich. Beide unendlichen Voraussichten unterscheiden sich jedoch voneinander: Erstere wird als prognostische Projektion in die Zukunft, letztere wird als epistemische Projektion in neue Bereiche des Möglichkeitsraums in Form von Herstellungsverfahren neuer Objekte sichtbar und handhabbar. Auf mathematischer Ebene basieren sie jedoch auf derselben Funktionslogik der Limes-Gestalten und dies macht es so interessant, das Computerlabor dem Experimentallabor vorzuschalten. Denn es etabliert sich ein grundlegend neues Welt-bezogen-auf-Akteure Verhältnis, indem mit den Herstellungsvorschriften selbst projektiv experimentiert werden kann, und zwar in der Weise, dass von diesen ‚Gebilden des vorstellenden Herstellens‘ Bilder generiert werden können, die greifbar und dadurch zum Objekt experimentellen Forschungshandelns werden. Diese Bilder basieren dabei einzig und allein auf der Funktionslogik der Limes-Gestalten im Gestaltungsgebiet der Mannigfaltigkeiten, insofern sich „die anschauliche geometrische Linie [...] in eine reine Wertfolge von Zahlen auf[löst], die durch eine bestimmte arithmetische Regel miteinander verknüpft sind“ (Cassirer 1910: 95).²⁵

Ein Beispiel für diesen neuen Modus der Re-Kontextualisierung wie auch der Sichtbarmachung und damit der neuen Form der Forschung bietet die Strukturchemie. Im Laufe der letzten dreihundert Jahre hat die Chemie ihre Struktursprache zu einem operativen Werkzeug entwickelt, das es ihr erlaubt, Moleküle und deren chemische und physikalische Eigenschaften numerisch zu beschreiben und in ihrer Dreidimensionalität symbolisch darzustellen.²⁶ Mit dieser theoriebasierten Darstellung

25 Insofern entspricht das visualisierte Resultat einer Simulation nie einer mimischen oder darstellenden Form von Sichtbarkeit, die einen Bildvergleich zwischen visualisierten Simulationsresultaten und Sinnlich-Gegebenen ermöglichen würde. Die Visualisierungen der Resultate der Computereperimente sind keine Bilder der Welt, sondern allenfalls der mathematisierten, algorithmierten und numerisch berechneten Theorie.

26 Die Stereochemie beschreibt die chemischen und physikalischen Moleküleigenschaften, basierend auf der dreidimensionalen Anordnung der Atome im Raum, die aus der Elektronenverteilung im Molekül resultieren. Diese Beschreibungen lassen sich im Computer numerisch darstellen und als

lassen sich neue, bisher nicht existierende Moleküle im Computer numerisch simulieren und deren potenzielle Eigenschaften vorhersagen. Der Bestand dieser Moleküle aus dem Computerlabor umfasst bereits rund siebzehn Millionen berechnete und in Datenbanken abgespeicherte Molekülverbindungen, von potenziell 10^{100} möglichen Molekülen basierend auf dem aktuellen chemischen Wissen. „Das [... eigentliche] Potential der generierten Daten liegt jedoch in der in ihnen verborgenen Information, die sich aus den Relationen zwischen den gesammelten Daten ergibt. Diese implizit in den Daten enthaltene Information wie beispielsweise die Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Strukturdaten ist der zentrale Schlüssel für die Generierung von chemischen Modellen sowie zur Vorhersage von allgemeinen, chemischen Sachverhalten“ (Öllien 2002: 9). Die Logik chemischer Forschung verschiebt sich vom Hantieren mit Substanzen im Reagenzglas hin zur Erforschung des digitalen Terrains virtueller Moleküle und deren prognostizierter Eigenschaften. Entdeckungen in dieser digitalen und theoretisch komplett explizierten Welt des Computerlabors vollziehen sich in anderer Weise als dies bisher im Experimentallabor der Fall war. Bislang fand der Prozess der Stabilisierung neuer Entdeckungen auf dem theoretisch unterdeterminierten Terrain der Experimentallabore als operationales Umdefinieren in stabilen Umgebungen statt. Forschen im Computerlabor vollzieht sich im Fall der Chemie auf Basis kombinatorischer, vergleichender und extrapolierender Praktiken im Umgang mit rein symbolischen Konfigurationen, die allesamt mathematisch-logischer Natur sind. Die neuen und für spezifische Zwecke, wie beispielsweise die Medikamentenentwicklung, selektierten Entdeckungen werden als komplett konstruierte Entitäten samt Herstellungsvorschrift im Computerlabor generiert und erst danach im Experimentallabor synthetisiert und in die Lebenswelt entlassen. Auf diese Weise, als computergestütztes ‚Design von Natur‘, entstehen neue Moleküle und Medikamente. In diesem epistemischen Potenzial der experimentellen Mathematik, die das Computerlabor zur Erforschung des Möglichkeitsraumes mathematischer Anschauung nutzt, liegt das Potenzial der Wissenschaft im Zeitalter des Computers. In ihm „[meldet sich] die Natur in [...] rechnerisch feststellbarer Weise [...] und [wird] als ein System von Informationen bestellbar“ (Heidegger 1949/1962: 22).

3D-stereo Bilder simulierter Moleküle visualisieren, welche die Forscher durch Datenbrillen als plastische Objekte wahrnehmen und mittlerweile auch als haptische Objekte mit Datenhandschuhen manipulieren können. Ihre haptischen Manipulationen werden dann in Herstellungsanleitungen zurückgerechnet.

Dieses Potenzial ist inspirierend wie beängstigend zugleich. Denn es ist davon auszugehen, dass dieser neue Typ von Forschung nicht nur die wissenschaftliche Erfahrung verändert, sondern auch das, was wissenschaftlich als real gilt. Nachdem die Eigenschaften der extremen Welt I in Form von mathematischen Idealisierungen der Körperwelt, die ex datis konstruierbar ist, bereits Eingang in die Lebenswelt gefunden haben, folgen nun die Eigenschaften der extremen Welt II. In diesen Veränderungen kommt die Umkehrung des Durchblicks ins Innere der Phänomene nicht nur in seiner verdichteten, symbolischen Form, sondern in auch seiner operativen Form voll zum Tragen. Die Frage, welche Folgen diese Operativität auf die Lebenswelt haben wird, ist nicht einfach zu beantworten. Sicherlich ist das dargestellte Design der Natur eine dieser grundlegenden Folgen. Dabei gehen das Design und der Blick tiefer als bisher, insofern die Natur nicht nur material, sondern zunehmend informationell als ein ‚System von Informationen bestellbar‘ wird. Auf diese Weise werden materiale Konstruktionen informationell angereichert und zwar in indirekter wie auch direkter Weise. Indirekt in der bisher üblichen Art und Weise neue Konstruktionen entsprechend technischer Konstruktionsvorschriften herzustellen. Direkt, indem materiale Komponenten so arrangiert werden, dass sie Informationen in sich tragen und auf Basis dieser Informationen Entscheidungen treffen. Beispiele wären hier adaptive Materialien, die sich den Umweltbedingungen anpassen können. Dabei kann es sich nicht um einen repräsentationalen Informationsbegriff handeln, sondern eben um einen operativen. Verfolgt man diesen Gedankengang weiter, dann zeigt sich, dass Computerexperimente einerseits die Vollendung der wissenschaftlichen Revolution der Neuzeit bedeuten, indem sie Mathematik und Quantifizierung operativ im Medium des Computers zur Anwendung bringen. Dass sie aber andererseits den Beginn einer neuen Wissenschaftsentwicklung markieren, der eine Umkehrung der empirischen Wissenschaft in eine konstruktive bedeutet. Konstruktiv, insofern die Empirie nicht als eine gegebene, sondern als eine umgestaltbare Folie der Wissenschaft über die bisherigen technisch erzeugten Welten und Laborrealitäten hinaus fungiert. Möglich ist dies nur durch die spezifische symbolische Form der Computerexperimente und der Entfaltung ihrer operativen Kraft. Diese ‚operative Kraft‘ kann den Zeichenraum des Computerlabors verlassen, wenn es technisch möglich ist, materiale Entitäten in immer höherer Auflösung – also von der Mikro- auf die Nanoebene – so zu manipulieren, wie dies die Simulation mit den symbolischen Entitäten im Computer macht. Die digitale Kette reicht dann vom Computer, über automatisierte Fertigungsmaschinen, in die Lebenswelt. 3D-Printing, wie es im Modellbau der Architektur, aber auch in der Herstellung von Haut auf Basis leben-

der Zellen zunehmend Einsatz findet, wäre ein Beispiel für das realweltliche Ende einer solchen digitalen Kette. Damit folgt nach der Transformation der mathematischen Symbolwelten in Mannigfaltigkeiten die Transformation der Lebenswelt in einen Raum manipulierbarer Mannigfaltigkeiten. Rekombinationen, Neukonfigurationen und Extrapolationen werden dadurch als Handlungsoptionen in einem hoch aufgelösten realweltlichen Setting möglich und diese Handlungsoptionen lassen sich digital und regelbasiert mit Hilfe der Computer steuern. Diese Entwicklung basiert dabei in erster Linie auf der höheren Auflösung des Raumes der Mannigfaltigkeiten als bisher für technische Konstruktionen üblich. Doch sie basiert nicht nur alleine darauf. Die steuerbare und kontrollierbare Operativität auf Symbolebene jenseits anschaulicher und geometrischer Vorstellungswelten eröffnet neue Entwicklungsmöglichkeiten im Design der Natur. In diesem Sinne begründet die Kulturtechnik des Rechnens eine neue Kulturtechnik der Konstruktion als rein typographisches Operieren mit Materialität.

Literatur

- Ahrweiler, Petra; Gilbert, Nigel (Hrsg.): Computer Simulations in Science and Technology Studies, Springer: New York, Berlin, Heidelberg 1998
- Albertus Magnus, 1248, in: Sturlese, Loris: Die deutsche Philosophie im Mittelalter. Von Bonifatius bis zu Albert dem Großen (748-1280), Beck: München 1993
- AMIP Atmospheric Model Intercomparison Project: Homepage, 2009, URL: <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/index.php>
- Arakawa, Akio: A Personal Perspective on the early Years of General Circulation Modeling at UCLA, in: Randall 2000: 1-65
- Archibald, R. C.: The Logarithmic Spiral, in: Amer. Math. Monthly 25, 1918: 189-193
- Aristoteles: Meteorologie. Über die Welt, Bd. 12, Teil 1 und 2, Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1970
- Arrhenius, Svante: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, in: Philosophical Magazine and Journal of Science 41, 1896: 237-276
- Arrhenius, Svante: Lehrbuch der kosmischen Physik, 2 Bde., Hirschel: Leipzig 1903
- Babbage, Charles: Passages of the Life of a Philosopher, Vol. 11 of The Works of Charles Babbage (herausgegeben von Martin Campbell-Kelly), Longman: London 1989
- Backus, John; Herrick, H.: IBM 701 Speedcomputing and other automatic-programming-systems, in: Proc. Symposium Automatic Programming Digital Computers, Office of Naval Research, Dept. of the Navy, Washington D.C. 1954: 106-113
- Backus, John; Heising, W.P.: FORTRAN, in: IEEE Trans. Electron. Comp. 13, 1964: 382-385
- Backus, John: Programming in America in the 1950s – Some Personal Impressions, in: Metropolis, Howlett, Rota 1980: 125-136
- Bacon, Francis: The New Organon, or True Directions concerning the interpretation of Nature, 1620, Elektronische Ressource: eBooks@Adelaide, URL: <http://ebooks.adelaide.edu.au>
- Bacon, Francis: Neu Atlantis, 1642, Reclam: Stuttgart 1982, Elektronische Ressource: eBooks@Adelaide, URL: <http://ebooks.adelaide.edu.au>
- Bacon, Roger: The opus majus of Roger Bacon, 1268 (übersetzt und herausgegeben von Robert Belle Burke), Thoemmes Press: Bristol 2000
- Bailey, James: After Thought. The Computer Challenge to Human Intelligence, Basic Books: New York 1996
- Bardi, Jason S.: The Calculus Wars. Newton, Leibniz, and the greatest mathematical clash of all times, Thunders's Mouth Press: New York 2006

- Barrow, Isaac: *Lectiones opticae et geometricae*, 1670, Elektronische Ressource: ECHO European Cultural Heritage Online, URL: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>
- Bayes, Thomas: An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances, in: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53, 1763: 370-418, Elektronische Ressource: UCLA Department of Statistics, URL: <http://www.stat.ucla.edu/history/essay.pdf>
- Beheng, K. D.: A parameterization of warm cloud microphysical conversion processes, in: *Atmos. Res.* 33, 1994: 193-206
- Beni, Gerardo; Wang, Jing: Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, in: *Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*, Tuscany, Italy, June 26-30, 1989
- Berg, Axel; Jones, J.; Osseyran, A.; Wielinga, P.: e-Science Park Amsterdam, Report, January 2003, Elektronische Ressource: Wetenschap & Technologie Centrum Watergraafsmeer, URL: <http://www.wtcw.nl/nl/projecten/eScience.pdf>
- Bergmann, Ludwig; Schaefer, C.; Dorfmueller, T.; Hering, W.T.; Stierstadt, K.: *Lehrbuch der Experimentalphysik: Mechanik, Relativität, Wärme*, de Gruyter: Berlin, New York 1998
- Berkeley, George: The analyst: or a discourse addressed to an infidel mathematician, London 1734, in: *The works of George Berkeley*, Bd. 4 (herausgegeben von Arthur A. Luce), Nelson: London 1951
- Berners-Lee, Tim: Information Management: A Proposal, CERN Genf 1989, Elektronische Ressource: w3w.org, URL: <http://www.w3.org/History/1989/proposal.html>
- Bernoulli, Jakob: De redivitibus ad vitam, in: *Acta Eruditorum*, Mai 1690, in: J. Bernoulli: *Opera omnia*, Bd. 1, Lausanne 1744: 427-431
- Biagre, Brian S. (Hrsg.): *A History of Modern Science and Mathematics*, 3 Bde., Scribner's: New York 2002
- Bigelow, Julian: Computer Development at the Institute for Advanced Study, in: *Metropolis*, Howlett, Rota 1980: 291-310
- Bigg, E. K.: The supercooling of water, in: *Proc. Roy. Soc.* 66, 1953: 688-694
- BIMP Bureau International des Poids et Mesures: Homepage, 2009 URL: <http://www.bipm.org>
- Bjerknes, Vilhelm: Über einen hydrodynamischen Fundamentalsatz und seine Anwendung besonders auf die Mechanik der Atmosphäre und des Weltmeeres, in: *Kongl. Sven. Akad. Handlingar* 31, 1898: 1-35
- Bjerknes, Vilhelm: Das dynamische Princip der Cirkulationsbewegung in der Atmosphäre, in: *Meteorologische Zeitschrift*, März 1900: 97-106 und fortgesetzt in *Meteorologische Zeitschrift*, April 1900: 145-156

- Bjerknes, Vilhelm: Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkt der Mechanik und Physik in: *Meteorologische Zeitschrift*, Januar 1904: 1-7
- Bjerknes, Vilhelm: *Dynamic Meteorology and Hydrography*, Bd.1 und Bd.2, Carnegie Institution of Washington: Washington, D.C 1910 und 1911
- Bjerknes, Vilhelm: Die Meteorologie als exakte Wissenschaft, (Antrittsvorlesung vom 8. Januar 1913), Vieweg: Braunschweig 1913
- Bjerknes, Vilhelm: The Structure of the Atmosphere When Rain is Falling, in: *Quart. J. of the Roy. Meteor. Soc.* 46, 1919: 119-140
- Bjerknes, Vilhelm: On the Dynamics of the Circular Vortex with Applications to the Atmosphere and to Atmospheric Vortex and Wave Motion, *Kristiana, Geophysiske Publikationer*, Vol. 2, 1921: 1-81
- Bjerknes, Vilhelm: Leipzig-Bergen. Festvortrag zur 25-Jahrfeier des geophysikalischen Instituts der Universität Leipzig, (Sonderdruck aus der *Zeitschrift für Geophysik*, Jg. 14, Heft 3,4) *Meteorologische Zeitschrift*, April 1938: 49-62
- Blechmann, Ilja; Myskis, A.D.; Panovko, J.G.: *Angewandte Mathematik. Gegenstand, Logik, Besonderheiten*, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften: Ost-Berlin 1984
- Bloor, David: *Knowledge and social imagery*, Routledge: London 1976
- BMFT Bundesministerium für Forschung und Technologie: Initiative zur Förderung des parallelen Höchstleistungsrechnens in Wissenschaft und Wirtschaft, BMFT Broschüre, Bonn 1993
- Böhme, Gernot; van den Daele, W.; Krohn, W. (Hrsg.): *Experimentelle Philosophie, Ursprünge autonomer Wissenschaftsentwicklung*, Suhrkamp: Frankfurt 1977
- Böhme, Gernot: Die kognitive Ausdifferenzierung der Naturwissenschaften. Newtons mathematische Naturphilosophie, in: Böhme, van den Daele, Krohn 1977: 237-263
- Böhme, Gernot; van den Daele, Wolfgang: Erfahrung als Programm, in: Böhme, van den Daele, Krohn 1977: 183-236
- Bond, Allan H.; Gasser, Less (Hrsg.): *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers: San Mateo 1988
- Böttinger, Michael: Klimaprognosen, Daten und Visualisierung, in: Tätigkeitsbericht 2005, Max Planck Gesellschaft, München 2005, Elektronische Ressource: Max Planck Gesellschaft URL: <http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/jahrbuch/2005/dkrz/forschungsSchwerpunkt/pdf.pdf>
- Bolin, Bert: Multiple-parameter models of the atmosphere for numerical forecasting purpose, in *Tellus* 5, 1953: 207-218

- Bolin, Bert; Eriksson, E. (Hrsg.): The Atmosphere and the Sea in Motion: Scientific Contributions to the Rossby Memorial Volume, Rockefeller Institute Press: New York 1959
- Bourke, Warner W.: A multi-level spectral model 1: Formulation and hemispheric integrations, in: Mon. Weather Rev. 102, 1974: 687-701
- Boyle, Robert: The Works of Robert Boyle, 14 Bde., (herausgegeben von Michael Hunter und Edward B. Davis), Pickering&Chatto Publishers: London 2000
- Boyle, Robert: Hydrostatical paradoxes, 1666, in: Boyle 2000: 5. Bd.
- Boyle, Robert: New Experiments Physio-Mechanicall, Touching the Spring of the Air and its Effects, Appendix, 1662, in: Boyle 2000: 3. Bd.
- Boyle, Robert: Certain Physiological Essays, 1661, in: Boyle 2000: 2. Bd. (Auszüge abgedruckt in: Crombie 1994: 947-979)
- Braitenberg, Valentin; Hosp, Inga (Hrsg.): Simulation. Computer zwischen Experiment und Theorie, Rowohlt: Reinbek bei Hamburg 1995
- Bredekamp, Horst; Krämer, Sybille (Hrsg.): Bild Schrift Zahl, Fink: München 2003
- Bredekamp, Horst; Krämer, Sybille: Kultur, Technik, Kulturtechnik: Wider die Diskurisierung der Kultur, in: Bredekamp, Krämer 2003: 11-22
- Bryden, David J.: Napier's Bones: A History and Instruction Manual, The Hillingdon Press: Uxbridge 1992
- Burkholder, Leslie (Hrsg.): Philosophy and the Computer, Westview Press: Boulder u.a. 1992
- Burks, Arthur W.: From ENIAC to the stored-program computers, in: Metropolis, Howlett, Rota 1980: 311-344
- Burks, Arthur W.; Goldstine, H., von Neumann, J.: Preliminary Discussions of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument, in: Datamation 28.6.1946, Institute for Advanced Study: Princeton 1946
- Bush, Vannevar; Hazen, Herold L.: The differential analyzer: a new machine for solving differential equations, in: Journal of the Franklin Institute 212, Oct. 1931: 447-488
- Bush, Vannevar: Instrumental Analysis, in: Bull. Amer. Math. Soc. 42, 1936: 649-669
- Caesalpino, Andrea: De Plantis Libri, Florenz 1583, Elektronische Ressource: Gallica, bibliothèque numérique de la Bibliothèque nationale de France, URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k58230d>
- Campbell-Kelly, Martin; Aspray, William: Computer: A History of the Information Machine, Westview Press: Jackson 2004
- Cantor, Moritz: Vorlesungen zur Geschichte der Mathematik, Bd. 3, 2. Aufl., Teubner: Leipzig 1901, Elektronische Ressource: Internet Archive, URL: <http://www.archive.org>

- Carnap, Rudolf: Die Aufgabe der Wissenschaftslogik, in: Schulte, McGuinness 1992: 90-117
- Cassirer, Ernst: Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik, Verlag Bruno Cassirer: Berlin 1910
- Cassirer, Ernst: Philosophie der Symbolischen Formen: Die Sprache, 1923, 1. Bd., 9. Aufl., Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1988
- Cassirer, Ernst: Philosophie der Symbolischen Formen: Das Mythische Denken, 1924, 2. Bd., 9. Aufl., Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1987
- Cassirer, Ernst: Philosophie der Symbolischen Formen: Phänomenologie der Erkenntnis, 1929, 3. Bd., 9. Aufl., Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1990
- Cassirer, Ernst: Form und Technik, 1930, in: Fischer 2004: 157-213
- Celsius, Anders: Beobachtungen von zweien beständigen Graden auf einem Thermometer, in: Königl. Schwedische Akademie der Wissenschaften, Abhandlungen aus der Naturlehre, Haushaltungskunst und Mechanik 4, 1742: 197-205
- Ceruzzi, Paul E.: A History of Modern Computing, MIT Press: Cambridge 1998
- CF Metadata Convention: NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions, Version 1.4, Februar 2009, Elektronische Ressource: CF Metadata URL: <http://cf-pcmdi.llnl.gov/documents/cf-conventions/1.4/cf-conventions.pdf>
- Chamberlin, E. H.: An experimental imperfect market, in: Journal of Political Economy 56, 2, 1948: 95-108
- Charney, Jule G.: On the Scale of Atmospheric Motion, in: Geofysiske Publikasjoner 17, Heft 2, 1948: 1-17
- Charney, Jule G.: On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere, in: J. Meteor. 6, 1949: 371-385
- Charney, Jule G.; Fjørtoft, J., v. Neumann, J.: Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation, in: Tellus 2, 1950: 237-254
- Charney, Jule G.; Phillips, Norman: Numerical integration of the quasi-geostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows, in: J. Meteor. 10, 1953: 71-99
- Charney, Jule G.: Impact of computers on meteorology, in: Computer Physics Communications 3, Suppl., 1972: 117-126
- Charney, Jule G.: Dynamics of Deserts and Drought in the Sahel, in: Quart. J. R. Met. Soc. 101, 1975: 193-202
- Church, Alonzo: Unsolvable problem of elementary number theory, in: Amer. J. Math. 858, 1936: 345-363
- Church, Alonzo: A note on the Entscheidungsproblem, in: J. Symb. Logic 1, 1936: 40-41, cor. 101-102

- Claussen, Martin, et al.: Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models, in: *Clim. Dyn.* 18, 2002: 579-586
- Clarkson, Geoffrey; Simon, Herbert A.: Simulation of individual and group behavior, in: *American Economic Review* 50, 5, 1960: 920-932
- CMIP Coupled Model Intercomparison Project: Homepage, 2009, URL: <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/cmip/>
- Coenen, Christopher: Konvergierende Technologien und Wissenschaften. Der Stand der Debatte und politischen Aktivitäten zu ‚Converging Technologies‘, Berlin 2008, Elektronische Ressource: ITAS Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, URL: <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2008/coen08a.pdf>
- Conte, Rosaria; Hegselmann, R.; Terna, P. (Hrsg.): *Simulation Social Phenomena*, Springer: Berlin 1997
- Courant, Richard; Robbins, Herbert: *What is mathematics?*, Oxford Univ. Press: Oxford 1941
- Coy, Wolfgang: Gutenberg und Turing: Fünf Thesen zur Geburt der Hypermedien, in: *Zeitschrift für Semiotik* 16, 1994: 69-74
- Crombie, Alistair C.: *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition. The history of argument and explanation especially in the mathematical and biomedical sciences and arts*, Bd. 2, Duckworth: London 1994
- Daston, Lorraine: *Wunder, Beweise und Tatsachen. Zur Geschichte der Rationalität*, Fischer: Frankfurt 2003
- Davis, Martin (Hrsg.): *The Undecidable. Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems, and Computable Functions*, Hewlett: New York 1964
- Dear, Peter: *Disciplines & Experience. The Mathematical Way in the Scientific Revolution*, Chicago Univ. Press: Chicago 1995
- DEKLIM Deutsches Klimaprogramm: Homepage, 2006, URL: <http://www.deklim.de/seiten/dek-frame.asp>
- Deluc, Jean-André: *Recherches sur les modifications de l’atmosphère ou théorie des baromètres et des thermomètres*, 2 Bde., Genf 1772
- Descartes, René: *Regeln zur Ausrichtung der Erkenntniskraft* 1628, (herausgegeben von Lüder Gäbe), Meiner: Reinbek bei Hamburg 1972
- Descartes, René: *Geometrie*, 1637 (herausgegeben von Ludwig Schlesinger), Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1981
- Descartes, René: *Discours de la méthode*, 1637 (herausgegeben von Lüder Gäbe), *Von der Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Forschung*, 2. Aufl., Meiner: Reinbek bei Hamburg 1907
- Decyk, Viktor K.; Norton, Ch.D.; Szymanski, B.K.: Expressing Object-Oriented Concepts in Fortran90, in: *ACM Fortran Forum* 16, April 1997: 13-18

- DEISA Distributed European Infrastructure for Supercomputing Applications: Homepage, 2009, URL: <http://www.deisa.eu>
- DFN Deutsche Forschungsnetz: Homepage, 2009, URL: <http://www.dfn.de/>
- D-Grid Initiative: Homepage, 2009, URL: <http://www.d-grid.de>
- DIN Deutsches Institut für Normierung: Homepage, 2009 URL: <http://www.din.de>
- DKRZ Deutsches Klimarechenzentrum: Homepage, 2000, URL: <http://www.dkrz.de>
- Dove, Heinrich Wilhelm: Über Maass und Messen oder Darstellung der bei Zeit-, Raum- und Gewichts-Bestimmungen üblichen Maasse, Messinstrumente und Messmethoden: nebst Reductionstabellen, 2. Aufl., Sander: Berlin 1835
- Dove, Heinrich Wilhelm: Meteorologische Untersuchungen, Sander: Berlin 1837
- Dowling, Deborah C.: Experiments on Theories: the construction of scientific computer simulation, Dissertation an der University of Melbourne, Februar 1998
- Dowling, Deborah C.: Experimenting on Theories, in: Science in Context 12, 1999: 261-274
- Duhem, Pierre: Ziel und Struktur der physikalischen Theorien, Barth: Leipzig 1908
- DWD Deutscher Wetterdienst: Homepage, 2009, URL: <http://www.dwd.de/>
- Echeverria, Javier; Ibarra, A.; Mormann, Th. (Hrsg.): The Space of Mathematics. Philosophical, Epistemological, and Historical Explorations, de Gruyter: Berlin, New York 1992
- Eckert, Michael: The Dawn of Fluid Dynamics. A Discipline between Science and Technology, Wiley-Vch: Weinheim 2006
- ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: Homepage, 2009, URL: <http://www.ecmwf.int/>
- Edwards, Paul N.: A Brief History of Atmospheric General Circulation Modeling, in: Randall 2000: 67-90
- Einstein, Albert: Zur Elektrodynamik bewegter Körper, in: Annalen der Physik 17, 1905: 891-921
- Einstein, Albert: Physik und Realität, in: Zeitschrift für Freie Deutsche Forschung 1, 2, 1938: 1-14
- Emaiss, Stefan; Lüdecke, Cornelia (Hrsg.): From Beaufort to Bjerknes and Beyond. Critical Perspectives on Observing, Analyzing, and Predicting Weather and Climate, Rauner: Augsburg 2005
- ENES European Network for Earth System Modelling: Homepage, 2009, URL: <http://www.enes.org/>

- Enke, W.; Spekat, A.: Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression, in: *Climate Research* 8, 1997: 195-207
- Ekholm, Nils: Etude des conditions météorologiques à l'aide des cartes synoptiques représentant la densité de l'air, in : *Kongl. Sven. Vetensk. Akad. Handlingar* 16, 1891 : 14-15
- Ekholm, Nils: Wetterkarten der Luftdruckschwankungen, in : *Meteorologische Zeitschrift*, August 1904: 345-357
- Elisassen, A. : Simplified Models of the atmosphere, designed for the purpose of numerical weather prediction, in : *Tellus* 4, 1952: 145-156
- El-Kazwini, Zakarija Ben Muhamed Ben Mahmud: *Kosmographie*, 13. Jahrhundert, in: *Hellmann* 1904: 127-142
- Elzinga, Aant: From Arrhenius to Megascience: Interplay between science and public decision making, in: *Ambio*. 26, 1997: 72-80
- ERA-40: Homepage, ECMWF 40 Year Reanalysis (ERA-40), 2009, URL: <http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/index.html>
- ESMF Earth System Model Framework: Homepage, 2006, URL: <http://www.esmf.ucar.edu>
- Euklid: *Die Elemente*. Bücher I-XIII, 325 v. Chr. (herausgegeben von Clemens Thaer), 4. Aufl., Harri Deutsch: Frankfurt 2003
- Euler, Leonhard: *Opera omnia*, I. *Opera mathematica*, 29 Bde., II. *Opera mathematica*, 31 Bde., (herausgegeben von H.-C. Im Hof et al.), Birkhäuser: Basel 1911-2009
- Euler, Leonhard: *Introductio in analysin infinitorum*, 1748, in: Euler 1911-2009, I., Bd. 8, 1922 und Bd. 9 1945
- Euler, Leonhard: *Dissertation sur le principe de la moindre action*, 1753, in: Euler 1911-2009, II., Bd. 5, 1957: 179-193
- Euler, Leonhard: *Principes généraux du mouvement des fluides*, 1755, in: Euler 1911-2009, II, Bd. 12, 1954: 54-91
- EUROCS European Cloud Systems: Homepage, 2003, URL: <http://www.cnrn.meteo.fr/gcss/EUROCS/EUROCS.html>
- European Centre for Soft Computing: Homepage 2009, URL: <http://www.softcomputing.es>
- Exner, Felix: Versuch einer Berechnung der Luftdruckveränderung von einem Tag zum nächsten, *Sitz.-Ber. Wiener Akad. Wiss* 111, 1902: 707-725
- Exner, Felix: Über eine erste Annäherung zur Vorausberechnung synoptischer Wetterkarten, *Meteorologische Zeitschrift* 25, 1908: 57-67
- Fahrenheit, Daniel: *Experimenta & Observationes de Congelatione aquae in vacuo factae*, in: *Phil. Trans. R. Soc.* 33, 1724: 78-84
- Fibonacci, Leonardo: *Liber Abaci*, 1209
- Fine, Arthur; Frobese, Micky; Wessels, Linda (Hrsg.): *PSA 1990*, 2. Bd., *Proceedings of the 1990 biennial meetings of the Philosophy of Science As-*

- sociation, East Lansing, Michigan, Philosophy of Science Association 1991
- Flasch, Kurt: Das philosophische Denken im Mittelalter, Reclam: Stuttgart 1995
- Fleck, Ludwik: Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache, 1935, Suhrkamp: Frankfurt 1994
- Folkerts, M. (Hrsg.): Muhammad Ibn-Musa al-Hwarizmi. Die älteste lateinische Schrift über das indische Rechnen, Bayerische Akad. der Wiss.: München 1997
- Fox Keller, Evelyn: Models, Simulation, and Computer Experiments, in: *Rader* 2003: 198-215
- Fermat, Pierre de: Abhandlungen über Maxima und Minima, 1629, (herausgegeben von M. Miller), Akademische Verlagsgesellschaft: Leipzig 1934
- Fischer, Peter (Hrsg.): Technikphilosophie, Reclam: Leipzig 2004
- Fleming, James R.: History of Meteorology, in: *Biagre*, 3. Bd., 2002: 184-217
- Flik, Thomas: Mikroprozessortechnik und Rechnerstrukturen, Springer: Berlin 2004
- Fontenelle, Bernard de: History de renouvellement de l'Académie royale des sciences en M.DC.XCIX et les. éloges historiques, 1709, (Nachdruck) Brüssel, 1. Bd., 1969: 31-43
- Franklin, Allan: The Neglect of Experiment, Cambridge University Press: New York 1986
- Frederichs, Günther: Der Wandel der Wissenschaft, in: *TA-Datenbank-Nachrichten* 8, 3/4, Dez. 1999: 16-25
- Friedman, Robert M.: Appropriating the Weather. Vilhelm Bjerknes and the Construction of a Modern Meteorology, Cornell University Press: Ithaca, London 1989
- Fritz, Walter von: Grundprobleme der Geschichte der antiken Wissenschaft, de Gruyter: Berlin, New York 1971
- Fuhrmann, Frederik; Kleis, U.; Mackens, W.: Partielle Differentialgleichungen und Numerische Software, in: *Nagel* 1996: 119-130
- Galle, Joahnn G.: Account of the discovery of the planet of Le Verrier at Berlin, in: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 7, Nov. 1846: 153
- Galileo, Galilei: Il Saggiatore, 1623, (herausgegeben von Ottavio Besomi), Editrice Antenore: Padua 2005
- Galileo, Galilei: De motu antiquiora, 1590, (herausgegeben von Michele Camerota), CUEC: Cagliari 1992
- Galison, Peter; Stump, David J. (Hrsg.): The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power, Stanford University Press: Stanford, CA 1996
- Galison, Peter: Computer Simulation and the Trading Zone, in: *Galison, Stump* 1996: 118-157

- Gates, Lawrence W.: Modeling the Ice-Age Climate, in: Science 191, 1976: 1138-1144
- Gates, Lawrence W.; Rowntree, P.R.; Zeng, Q.-C.: Validation of climate models, in: J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums: Climate Change, the IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press: Cambridge 1990: 93-130
- Gates, Lawrence W.: Ein kurzer Überblick über die Geschichte der Klimamodellierung, in: Promet 29, 2003: 3-5
- Gauß, Carl Friedrich: Werke, 12 Bde., (herausgegeben von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen) Springer: Berlin 1863-1929, Elektronische Ressource: GDZ Göttinger Digitalisierungszentrum, URL: http://gdz.sub.uni-goettingen.de/no_cache/dms/load/toc/?IDDOC=38910
- Gauß, Carl Friedrich: Theoria Motus Corporum Coelestium in sectionibus conicis solem ambientium, 1809, in: Gauß, Bd. 7, 1906: 6-288
- Gauß, Carl Friedrich: Bestimmung der Genauigkeit der Beobachtungen, 1816, in: Gauß, Bd. 4, 1873: 109-117
- Gauß, Carl Friedrich: Intensitas vis magneticae ad mensuram absolutam revocata, 1832, in: Gauß, Bd. 5, 1867: 81-118
- Gauß, Carl Friedrich: Das in den Beobachtungsterminen anzuwendende Verfahren, 1836, in: Gauß, Bd. 5, 1867: 541-556
- Gauß, Carl Friedrich: Auszug aus dreijährigen täglichen Beobachtungen der magnetischen Declination zu Göttingen, 1836a, in: Gauß, Bd. 5, 1867: 556-568
- Gauß, Carl Friedrich: Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus, 1838, in: Gauß, Bd. 5, 1867: 121-193
- Gauß, Carl Friedrich: Atlas des Erdmagnetismus, 1840, in: Gauß, Bd. 12, 1929: 326-413
- GCOS Global Climate Observing System: Homepage, 2009, URL: <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/index.php>
- GCS Gauss Centre for Supercomputing: Homepage, 2009, URL: <http://www.gauss-centre.eu/>
- GEANT: Homepage, 2009, URL: <http://www.geant.net>
- Gellibrand, Henry: A discourse mathematical on the variation of the magnetic needle, together with its admirable diminution lately discovered, London, 1635
- GENIE Grid Enabled Integrated Earth System Model: Homepage, 2009, URL: <http://www.genie.ac.uk/>
- Gericke, Helmuth: Geschichte des Zahlbegriffs, Bibl. Institut: Mannheim 1970
- Gladstone-Millar, Lynne: John Napier. Logarithm John, National Museums of Scotland Publications: Edinburgh 2003
- Gleininger, Andrea; Vrachliotis, Georg (Hrsg.): Simulation. Context Architecture, Birkhäuser: Basel 2008

- Glimm, James; Impagliazzo, J.; Singer, I. (Hrsg.): The Legacy of John von Neumann, Proceedings of Symposia in Pure Mathematics 1988, American Mathematical Society: Providence Rhode Island 1990
- Glimm, James: Scientific Computing: Von Neumann's Vision, Today's Realities, and the Promise of the Future, in: Glimm, Impagliazzo, Singer 1990: 185-195
- Goldstine, Herman H.: History of Numerical Analysis from the 16th Through the 19th Century, Springer: New York 1977
- Goldstine, Herman H.: History of the Calculus of Variations from the Seventeenth Through the Nineteenth Century, Springer: New York 1980
- Goldstine, Herman: The Computer from Pascal to von Neumann, Princeton University Press: Princeton 1993
- Goldstine, Herman H.; Neumann, John von: On the Principles of Large Scale Computing Machines, 1946, in: von Neumann 1963: 1-32
- Goldstine, Herman H.; Neumann, John von: Planning and Coding Problems for an Electronic Computing Instrument, 1947, Part II, Vol 1, in: von Neumann 1963: 80-151
- Gordon, C.T.: Verification of the GFDL spectral model, in: Colloquium on Weather Forecasting and Weather Forecasts: Models, Systems, and Users, Weather Forecasting and Weather Forecasts: Models, Systems and Users. National Centre for Atmospheric Research, Vol. 2, 1974: 745-762
- Gordon, C.T., Stern, W.: Spectral modelling at GFDL. The GARP Programme on Numerical Experimentation, Report of the International Symposium on Spectral Methods in Numerical Weather Prediction for GARP, Copenhagen, WMO, 1974: 46-82
- Gramelsberger, Gabriele: Theorie – Simulation – Experiment. Computergestützte Simulation als erkenntnistheoretische Erweiterung der Erklärungs- und Prognosemöglichkeiten in den Naturwissenschaften, Magisterarbeit an der Universität Augsburg, Institut für Philosophie, Juni 1996
- Gramelsberger, Gabriele: Semiotik und Simulation. Die Fortführung der Schrift ins Dynamische. Entwurf einer Symboltheorie der numerischen Simulation und ihrer Visualisierung, Dissertation an der Freien Universität Berlin, Institut für Philosophie, Juni 2001, Elektronische Ressource: Dissertationsserver der Freien Universität Berlin, URL: <http://darwin.inf.fu-berlin.de/2002/118/>
- Gramelsberger, Gabriele: Computersimulationen – Neue Instrumente der Wissensproduktion, Explorationsstudie, BBAW Akademie der Wissenschaften Berlin, Mai 2004, Elektronische Ressource: Science Policy Studies Initiative URL: http://www.sciencepolicystudies.de/dok/explorationsstudie_computersimulationen/inhaltsverzeichnis.html
- Gramelsberger, Gabriele: Schrift in Bewegung. Eine semiotische Analyse der digitalen Schrift, in: Schneider, Wedell 2004a: 101-122

- Gramelsberger, Gabriele: Vom Verschwinden der Orte in den Daten, in: Gegenworte – Hefte für den Disput über Wissen 16, BBAW Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaft, 2005: 31-35
- Gramelsberger, Gabriele: Die Verschriftlichung der Wissenschaft. Simulation als semiotische Rekonstruktion wissenschaftlicher Objekte, in: Grube, Kogge, Krämer 2005a: 439-452
- Gramelsberger, Gabriele: Story Telling with Code – Archaeology of Climate Modelling, in: TeamEthno-online, Issue 2, University of Lancaster, June 2006: 77-84
- Gramelsberger, Gabriele: Computersimulationen – Neue Instrumente der Wissensproduktion, in: Mayntz, Neidhardt, Weingart, Wengenroth 2008: 75-95
- Gramelsberger, Gabriele: The Epistemic Texture of Simulated Worlds, in: Gleininger, Vrachliotis 2008a: 83-91
- Gramelsberger, Gabriele: CO₂, Fische und das Klima im Computermodell, in: Soentgen, Reller 2009: 181-193
- Gramelsberger, Gabriele: Conceiving meteorology as the exact science of the atmosphere – Bjerknes revolutionary paper from 1904, in: Meteorologische Zeitschrift, 2009a (im Druck)
- Gramelsberger, Gabriele: Simulation – Analyse der organisationellen Etablierungsbestrebungen der (neuen) epistemischen Kultur des Simulierens am Beispiel der Klimamodellierung, in: Halfmann 2009b: 30-52
- Gramelsberger, Gabriele: Die numerische Expertise der Automatenhirne. Rationale Prognostik und Computermodelle, in: Hartmann, Vogel 2009c (im Druck)
- Gramelsberger, Gabriele (Hrsg.): From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its Influence on Today's Society, diaphanes Zürich, Berlin 2010 (im Druck)
- Greenleaf, Newcomb: Algorithmics: A New Paradigm for Mathematics, in: Burkholder 1992: 195-210
- Grier, David A.: When Computers were Human, Princeton University Press: Princeton 2005
- Grube, Gernot; Kogge, Werner; Krämer, Sybille (Hrsg.): Kulturtechnik Schrift. Die Graphé zwischen Bild und Maschine, Fink: München 2005
- Gunter, Edmund: The description and use of sector, the cross-staffe, and other instruments for such as are studious of mathematical practise, London 1624
- Gunter, Edmund: The Description and Use of His Majestie's Dials in Whitehall Garden, London 1624a
- Hacking, Ian: Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften, Reclam: Stuttgart 1996
- Hadley, George: The cause of the general Trade-Wind, Phil. Trans. R. Soc. 34, 1735: 58-62

- Halfmann, Jost (Hrsg.): Organisation(en) der Forschung, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2009
- Halley, Edmund: An historical account of the Trade-Winds and Monsoons observable in the seas between and near the Tropick, with an attempt to assign the physical cause of said Winds, Phil. Trans. R. Soc. 183, 1686: 153-168
- Hann, Julius: Handbuch der Klimatologie, 4. Aufl. Engelhorns: Stuttgart 1908
- Hansen, James; Lacis, A.; Ruedy, R., Sato, M.: Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption, in: Geophysical Research Letters 19, 1992: 215-218
- Harper, Kristine C.: The Scandinavian Tag-Team: Providers of atmospheric reality to numerical weather prediction efforts in the United States (1948-1955), in: Proceedings of the International Commission on History of Meteorology 1.1, 2004: 84-91
- Hartmann, Heinrich; Vogel, Jakob (Hrsg.): Prognosen. Zukunftswissen und Expertise in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft, Campus: Frankfurt 2009
- Hartmann, Stephan: The World as a Process, in: Hegselmann 1996: 77-100
- Haustein, Heinz-Dieter: Weltchronik des Messens – Universalgeschichte von Maß und Zahl, Geld und Gewicht, de Gruyter: Berlin 2001
- Hegselmann, Rainer; Müller, Ulrich; Troitzsch, Klaus G. (Hrsg.): Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, Kluwer Academics Publisher: Dordrecht 1996
- Heidegger, Martin: Die Zeit des Weltbildes, 1938, in: Heidegger 1977: 69-104
- Heidegger, Martin: Holzwege, Vittorio Klostermann: Frankfurt 1977
- Heidegger, Martin: Die Frage nach der Technik, 1949, in: Heidegger 1962: 5-47
- Heidegger, Martin: Die Technik und die Kehre, Cotta'sche Buchhandlung: Stuttgart 1962
- Heising, William P.: The Emergence of FORTRAN IV from FORTRAN II, in: IEEE Annals of the History of Computing 6, 1, 1984: 31-32
- Hellige, Dieter (Hrsg.): Geschichten der Informatik: Visionen, Paradigmen, Leitmotive, Springer: Heidelberg, Berlin 2004
- Hellmann, G.: Denkmäler Mittelalterlicher Meteorologie, (Nachdruck), Kraus: Berlin 1904
- Hempel, Carl; Oppenheim, Paul: Studies in the Logic of Explanation, in: Philosophy of Science 15, 1948: 135-175
- Henderson-Sellers, Ann; McGuffie, K.: A Climate Modelling Primer, John Wiley & Sons: Chichester 1987
- Henderson-Sellers, Ann; McGuffie K.: Concepts of Good Science in Climate Change Modelling, in: Climatic Change 42, 1999: 597-610
- Herrick, Harlan; Backhus, John: IMB 701 Speedcoding and other Automatic Programming Systems, in: Proceedings of the Symposium on Automatic Programming Digital Computer, Office of naval Research, Washington D.C., held May, 13-14, 1954: 111-112

- Hertz, Heinrich: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt, 3 Bde. 1891-1894, in: Hertz 1894: 3. Bd.
- Hertz, Heinrich: Gesammelte Werke, (herausgegeben von Philipp Lenard), J. A. Barth: Leipzig 1894
- Hesse, Mary: Models and Analogies in Science, University of Notre Dame Press: Notre Dame 1966
- Heymann, Matthias: Modeling reality. Practice, knowledge, and uncertainty in atmospheric transport simulation, in: Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 37, 2006: 49-85
- Hiebel, Hans: Kleine Medienzeichnung. Von ersten Schriftzeichen zum Microchip, Beck: München 1997
- Hinkelmann, K.: Ein numerisches Experiment mit den primitiven Gleichungen, in: Bolin, Eriksson 1959: 486-500
- Hinterwaldner, Inge: Simulationsmodelle. Zur Verhältnisbestimmung von Modellierung und Bildgebung in interaktiven Echtzeitsimulationen, in: Reichle, Siegel, Spelten, 2008: 301-314
- Holland, John H.: Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press: Ann Arbor 1975
- Hooke, Robert: A Method for Making a History of the Weather, in: Sprat 1959
- Hooke, Robert: A General Scheme, or Idea of the Present State of Natural Philosophy, and How its Defects may be Remedied by a Methodological Proceeding in the making Experiments and collecting Observations, whereby to compile a Natural History, as the Solid Basis for the Superstructure of True Philosophy, 1666 (Auszüge abgedruckt in: Crombie 1994: 992-998)
- Hopper, Grace: Development Log Book, 1945, Elektronische Ressource: Naval Historical Center, 2008, URL: <http://www.history.navy.mil/photos/images/h96000/h96566kc.htm>
- Hoßfeld, Friedel: ‚Grand Challenges‘ – wie weit tragen die Antworten des Supercomputing?, Bericht des Zentralinstituts für Angewandte Mathematik, KFA-ZAM-IB-9117 (21.11.1991), Forschungszentrum Jülich 1991
- Hoßfeld, Friedel: Wissenschaftliches Rechnen – Motor der Rechnerentwicklung, Bericht des Zentralinstituts für Angewandte Mathematik, KFA-ZAM-IB-9215 (23.09.1992), Forschungszentrum Jülich 1992
- Hoßfeld, Friedel: Partielle Differentialgleichungen: Die permanente Herausforderung, in: Nagel, Wolfgang (Hrsg.): Partielle Differentialgleichungen, Numerik und Anwendungen, Forschungszentrum Jülich 1996: 1-10
- Humboldt, Alexander von: Die Forschungsreise in den Tropen Amerikas (herausgegeben und kommentiert von Hanno Beck), Studienausgabe, Bd. II./Teilband 1, Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1997
- Humboldt, Alexander von: Kosmos, 5 Bde., Bd. 4, Cotta: Stuttgart 1858

- Humphreys, Paul (Hrsg.): Patrick Suppes: Scientific Philosopher, Vol. 2, Philosophy of Physics, Theory Structure, and Measurement Theory, Kluwer Academics Publishers: Dordrecht 1994
- Humphreys, Paul: Numerical Experimentation, in Humphreys 1994: 103-121
- Humphreys, Paul: Computer Simulations, in: Fine, Frobes, Wessels 1991: 497-509
- Humphreys, Paul: Extending Ourselves. Computational Sciences, Empiricism, and Scientific Method, Oxford University Press: Oxford 2004
- Hunt, J.C.R.: Lewis Fry Richardson and his contributions to mathematics, meteorology, and models of conflict, in: Annu. Rev. Fluid Mech. 1998: xiii-xxxvi
- Husserl, Edmund: Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie, Vortrag 1935, 3. Aufl., Meiner: Hamburg 1996
- IAS Institute for Advanced Simulation: Homepage, 2009, URL: http://www.fz-juelich.de/portal/ueber_uns/institute_einrichtungen/institute/ias
- Irfah, Georges: The Universal History of Computing: From the Abacus to the Quantum Computer, J Wiley & Sons, Inc.: New York 2001
- Internationales Polarjahr: Homepage, 2009 URL: <http://www.polarjahr.de>
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change: Homepage, 2009, URL: <http://www.ipcc.ch>
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change: Guidance Notes for Lead Authors of the IPCC Fourth Assessment Report on Addressing Uncertainties, 2005, Elektronische Ressource: IPCC, URL: http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4_UncertaintyGuidanceNote.pdf
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change: AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis, WG1, 2007, Elektronische Ressource: IPCC, URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change: Chairman's Vision Paper, AR5 Scoping Meeting Venice, Italy, 13-17 July 2009, Elektronische Ressource: IPCC, URL: http://www.ipcc.ch/scoping_meeting_ar5/documents/doc02.pdf
- I2G Interactive European Grid Project: Homepage 2009, URL: <http://www.i2g.eu>
- Jehnsen, Uwe: So viel läßt sich der Staat das Supercomputing kosten, in: Computerwoche 32, 1992, Elektronische Ressource: Computerwoche.de, URL: <http://www.computerwoche.de/heftarchiv/1992/32/1135464/>
- Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft, B 1787 (Nachdruck) Meiner: Hamburg 1993

- Kepler, Johannes: Gesammelte Werke (herausgegeben von Walther von Dyck und Max Caspar), 21. Bde., C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung: München 1938-2003
- Kepler, Johannes: *Mysterium cosmographicum de stella nova*, 1596, in: Kepler 1938-2003, Bd. 15, 2. Aufl., 1993
- Kepler, Johannes: *Astronomia Nova*, 1609, in: Kepler 1938-2003, Bd. 3, 2. Aufl., 1990
- Kepler, Johannes: *Chilias logarithmorum*, Marburg 1624
- Klein, Felix: Gesammelte mathematische Abhandlungen, 3 Bde., Springer: Berlin 1922
- Klein, Felix: Über die Arithmetisierung der Mathematik, 1895, in: Klein, 2. Bd., 1922: 232-240
- Klein, Jacob: Die griechische Logistik und die Entstehung der Algebra, in: Quellen und Studien zur Geschichte der Mathematik, Astronomie und Physik, Abteilung B: Studien, Bd. 3, Erstes Heft, Berlin 1934: 18-105 und Zweites Heft, Berlin 1936: 122-235, (übersetzt von Eva Brann) *Greek Mathematical Thought and the Origin of Algebra*, Dover Publications: New York 1992
- Klüver, Jürgen: *Soziologie als Computerexperiment*, Vieweg Verlagsgesellschaft: Braunschweig 1995
- Knobloch, Eberhard: *Historical Aspects of the Foundation of Error Theory*, in: Echeverria, Ibarra, Mormann 1992: 253-279
- Knorr Cetina, Karin: *The Manufacture of Knowledge. An Essay on the Constructivist and Contextual Nature of Science*, Pergamon Press: Oxford 1981
- Knorr Cetina, Karin: *Die Fabrikation von Erkenntnis*, 2. Aufl., Suhrkamp: Frankfurt 2001
- Knuth, Donald E.; Prado, Luis: *Early Development of Programming Languages*, in: Metropolis, Howlett, Rota 1980: 197-273
- Knuuttila, Tarja; Merz, M.; Mattila, E. (Hrsg.): *Computer Models and Simulations in Scientific Practice (Special Issue)*, *Science Studies: An Interdisciplinary Journal for Science and Technology Studies* 19, 1, 2006
- Koch, Peter; Krämer, Sybille (Hrsg.): *Schrift, Medien, Kognition. Über die Exteriorität des Geistes*, Stauffenburg: Tübingen 1997
- Koch, Peter: *Graphé. Ihre Entwicklung zur Schrift, zum Kalkül und zur Liste*, in: Koch, Krämer 1997: 43-82
- Krämer, Sybille: *Symbolische Maschinen. Die Geschichte der Formalisierung in historischem Abriß*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1988
- Krämer, Sybille: *Berechenbare Vernunft. Kalkül und Rationalismus im 17. Jahrhundert*, de Gruyter: Berlin, New York 1991

- Krämer, Sybille: Kalküle als Repräsentation. Zur Genese des operativen Symbolismus in der Neuzeit, in: Rheinberger, Hagner, Wahrig-Schmidt 1997: 111-122
- Krause, Egon: Einige grundsätzliche Aspekte numerischer Strömungssimulationen, in: Nagel 1996: 13-24
- Krohn, Wolfgang: Die ‚Neue Wissenschaft‘ der Renaissance, in: Böhme, van den Daele, Krohn 1977: 13-128
- Küppers, Günter; Lenhard, Johannes: Computersimulationen: Modellierungen zweiter Ordnung, in: Journal for General Philosophy of Science 36, 2005: 305-329
- Kuhn, Thomas: The Structure of Scientific Revolution, Univ. of Chicago Press: Chicago 1962
- Lagrange, Joseph-Louis: Oeuvres, 11 Bde., Gauthier-Villars et fils: Paris 1888
- Lagrange, Joseph-Louis: Mécanique analytique, 1788, in : Lagrange, 11. Bd., 1888
- Landau, Edmund: Grundlagen der Analysis, Chelsea Publ.: New York 1948
- Laplace, Pierre-Simon de: Traité de mécanique céleste, 2 Bde., Desaint: Paris 1798-1825, (übersetzt von Friedrich Wilhelm August Murhard), Analytische Mechanik, Vandenhoeck und Ruprecht: Göttingen 1797
- Laplace, Pierre-Simon de: Traité de mécanique céleste, 5 Bde, J.B.M. Duprat: Paris 1798-1825, (Bd. 1 und 2 übersetzt von Johann Carl Burckhardt), Mechanik des Himmels, Berlin 1800-1802
- Laplace, Pierre-Simon de: Essai philosophique sur les probabilités, Paris 1814, (herausgegeben von R. V. Mises) Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit, Akad. Verlagsgesellschaft: Leipzig 1932
- Latour, Bruno; Woolgar, Steve: Laboratory Life: the Social Construction of Scientific Facts, Sage: Los Angeles 1979
- Latour, Bruno: Science in Action, Harvard University Press: Princeton 1987
- Latour, Bruno: Die Hoffnung der Pandora. Untersuchungen zur Wirklichkeit der Wissenschaft, Suhrkamp: Frankfurt 2002
- Latour, Bruno: Zirkulierende Referenz, in: Latour 2002: 36-95
- Latour, Bruno: Von der Fabrikation zur Realität. Pasteur und seine Milchsäurefermente, in: Latour 2002: 137-174
- Leeuwenhoek, Anthony van: Brief vom 12. September 1683 an die Royal Society London, in: The Collected Letters of Antoni Van Leeuwenhoek, (herausgegeben von L.C. Palm et al.), 15 Bde., Swets and Zeitlinger: Amsterdam 1939-1999
- Leggett, G.R., et al.: Emissions Scenarios for the IPCC: an Update, in: Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, UK, 1992: 68-95
- Leibniz, Gottfried W.: Novae methodus pro maximis et minimis, 1673 in: Acta eruditorum, Okt. 1684: 466-73

- Leibniz, Gottfried W.: *Machina arithmetica in qua non additio tantum et subtractio sed et multiplicatio nullo, divisio vero paene nullo animi labore peragantur*, 1685, ins Englisch übersetzt und teilweise nachgedruckt in: Goldstine 1993: 8
- Leibniz, Gottfried W.: *De geometria recondita et analysi indivisibilium atque infinitorum*, in: *Acta eruditorum*, Mai 1686: 292-300
- Leibniz, Gottfried W.: *Briefwechsel mit Johann Bernoulli*, 1694, in: Gottfried W. Leibniz: *Sämtliche Schriften und Briefe*, III, Bd. 6, Akademie-Verlag: Berlin 2004
- Leibniz, Gottfried W.: *Explication de l'Arithmétique Binaire*, in: Hans J. Zacher: *Die Hauptschriften zur Dyadik von G.W. Leibniz*, Vittorio Klostermann: Frankfurt 1973
- Leisen, Josef: *Ansätze zur Mathematisierung der Elektrodynamik im 19. Jahrhundert*, 2008, Online Ressource: Studienseminar Koblenz, URL: <http://www.leisen.studienseminar-koblenz.de>
- Lenhard, Johannes; Küppers, G.; Shinn, T. (Hrsg.): *Simulation: Pragmatic Construction of Reality – Sociology of the Sciences 25*, Springer: Dordrecht 2007
- Lenhard, Johannes: *Artificial, False, and Performing Well*, in: Gramelsberger 2010 (im Druck)
- Letwin, William: *The origins of scientific economics: English economic thought 1660-1776*, Methuen & Co.: London 1963
- Levkov, L., Rockel, B., Kapitza, H., Raschke, E.: *3d mesoscale numerical studies of cirrus and stratus clouds by their time and space evolution*, in: *Beitr. Phys. Atmos.* 65, 1992: 35-58
- Lewis, John M.: *Clarifying the Dynamics of the General Circulation: Phillip's Experiment*, in: Randall 2000: 91-164
- Lin, Y.-L.; Farley, R. D.; Orville, H. D.: *Bulk parameterization of the snow field in a cloud model*, in: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 22, 1983: 1065-1092
- Linné, Carl von: *Species Plantarum*, 1753, Elektronische Ressource: Gallica bibliothèque numérique de la Bibliothèque nationale de France, URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k96632j>
- Lohmann, Ulrike; Roeckner, Erich: *Design and performance of a new cloud microphysics scheme developed for the ECHAM4 general circulation model*, in: *Clim. Dyn.*, 12, 1996: 557-572
- Lohmann, Ulrike; Feichter, J.; Kinne, S.; Quaas, J.: *Approaches for constraining global climate models of the anthropogenic indirect aerosol effect*, 2006, Manuskript eingereicht bei: *Bull. Am. Met. Soc* (akzeptierte und publizierte Version: Lohmann 2007a)

- Lohmann, U.; Quaas, J.; Kinne, S.; Feichter, J.: Different approaches for constraining global climate models of the anthropogenic indirect aerosol effect, in: Bull. Am. Meteorol. Soc., 88, 2007a: 243-249
- Lorenz, Edward N.: Deterministic Nonperiodic Flow, in: Journal of the Atmospheric Sciences 20, 2, 1963: 130-141
- Losee, John: Wissenschaftstheorie. Eine historische Einführung, Beck: München 1977
- Lovelace, Ada: Statement, 1842, Elektronische Ressource: Encyclopædia Britannica, URL: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/349551/Ada-King-countess-of-Lovelace>
- Lovelace, Ada: Statement, 1843, Elektronische Ressource: Kerry.net, URL: <http://www.kerryr.net/pioneers/ada.htm>
- Luce, R. D.; Bush, R., Galanter, E. (Hrsg.): Handbook of Mathematical Psychology, 1. Bd., Wiley: New York 1963
- Lüdtke, K.: Interdisziplinarität und Wissensentwicklung, in: Journal for General Philosophy Science 26, 1993: 93-117
- Lynch, Michael: Art and Artifact in Laboratory Science: A Study of Shop Work and Shop Talk in a Research Laboratory, Routledge Kegan & Paul: Beverly Hills 1985
- Lynch, Peter: Richardson's Marvellous Forecast, in: Shapiro, Gronas 1999: 61-73
- Lynch, Peter: Richardson's forecast factory: the 64.000 question, in: Meteorol. Mag. 122, 1993: 69-70
- Magnani, Lorenzo; Nersessian, Nancy; Thagard, Paul (Hrsg.): Model-Based Reasoning in Scientific Discovery, Springer: New York 1999
- Magnani, Lorenzo: Abduction, reason, and science: processes of discovery and explanation, Kluwer Academic Publishers: New York 2001
- Magnani, Lorenzo; Nersessian, Nancy (Hrsg.): Model-Based Reasoning. Science, Technology, Values, Kluwer Academic Publishers: New York 2002
- Magnetbandmuseum Wiesbaden: Homepage, 2009, URL: <http://www.magnetbandmuseum.info>
- Malpighi, Marcello: De pulmonibus observationes anatomicae, Brief an J. Alphons Borellium, Bolognia 1661
- Malpighi, Marcello: An Account of Some Discoveries Concerning the Brain, and the Tongue, Made by Signior Malpighi, Professor of Physick in Sicily, in: Phil. Trans. R. Soc. 2, 1666/1667
- Malcherek, Andreas: Hydromechanik der Oberflächengewässer, Version 5.0, Bundesanstalt für Wasserbau, 2001, Elektronische Ressource: Bundesanstalt für Wasserbau, URL: <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/nummeth/nummeth1.pdf>

- Manabe, Syukuro; Smagorinsky, J.; Strickler, R.F.: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle, in: Mon.Weather Rev. 93, 1965: 769-798
- Manabe, Syukuro; Wetherald, R.: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, in: J. Atmos. Sci. 24, 1967: 241-259
- Manabe, Syukuro; Bryan, K.: Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model, in: J. Atmos. Sci. 26, 1969: 786-789
- Manabe, Syukuro; Wetherald, R.: The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model, in: J. Atmos. Sci. 32, 1975: 3-15
- Mandelbrot, Benoît B.: The Fractal Geometry of Nature, Freeman & Co: San Francisco 1982
- Maskelyne, Nevil: Nautical almanac and astronomical ephemeris, London 1766
- MATHCOMP Heidelberg Graduate School of Mathematical and Computational Methods for the Sciences: Homepage, 2009, URL: <http://www.mathcomp.uni-heidelberg.de/>
- Mattern, Friedemann; Mehl, Horst: Diskrete Simulation – Prinzip und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung, in: Informatik-Spektrum 12, 1989: 198-210
- Mattila, Erika: Questions to Artificial Nature: a Philosophical Study of Interdisciplinary Models and their Functions in Scientific Practice. Philosophical Studies from the University of Helsinki 14, Dark oy: Helsinki 2006
- Mattila, Erika: Struggle between specificity and generality: How do infectious disease models become a simulation platform?, in: Küppers, Lenhard, Shinn, 2007: 125-138
- Mayer, Eugen: Das Rechnen in der Technik und seine Hilfsmittel, Göschen: Leipzig 1908
- Mayntz, Renate; Neidhardt, F.; Weingart, P.; Wengenroth, U. (Hrsg.): Wissensproduktion und Wissenstransfer. Wissen im Spannungsfeld von Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit, transcript: Bielefeld 2008
- Menninger, Karl: Zahlwort und Ziffer, 2. Aufl., Vandenhoeck & Ruprecht: Göttingen 1958
- Merleau-Ponty, Maurice: Phénoménologie de la perception, Paris 1945
- Merz, Martina: Multiplex and Unfolding: Computer Simulation in Particle Physics, in: Science in Context 12, 2, 1999: 293-316
- Merz, Martina: Kontrolle – Widerstand – Ermächtigung: Wie Simulationssoftware Physiker konfiguriert, in: Rammert, Schulz-Schaeffer 2002: 267-290
- Merz, Merz (2007): Locating the Dry Lab on the Lab Map, in: Lenhard, Küppers, Shinn 2007: 155-172

- Metcalf, Michael; Reid, John; Cohen, Malcolm: Fortran 95/2003 explained, Oxford University Press: Oxford 2004
- Metropolis, N.; Howlett, J.; Rotta, Gian-Carlo (Hrsg.): A History of Computing in the Twentieth Century, Academic Press: New York 1980
- Meurer, Hans-Werner (Hrsg.): Supercomputer'92, Anwendungen, Architekturen, Trends, Springer: Berlin 1992
- Miller, Clare; Edwards Paul N. (Hrsg.): Changing the atmosphere: expert knowledge and environmental governance, MIT Press: Cambridge, Mass. 2001
- Minsky, Marvin; Papert, Seymour: Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry, MIT Press: Cambridge 1969
- M&D Modelle & Daten Gruppe: Homepage, 2009, URL: <http://www.mad.zmaw.de/>
- Morgan, Mary S.; Morrison, Margaret (Hrsg.): Models as Mediators, Cambridge University Press.: Cambridge 1999
- Morgan, Mary S.; Morrison, Margaret: Models as Mediating Instruments, in: Morgan, Morrison 1999: 10-37
- Morgan, Mary S.: Models, Stories and the Economic World, in: Journal of Economic Methodology 8, 3, 2001: 361-84
- Morgan, Mary S.: Model Experiments and Models in Experiments, in: Magnani, Nersessian 2002: 41-58
- Morgan, Mary S.: Simulation: The Birth of a Technology to Create 'Evidence' in Economics, in: Revue d'Histoire des Sciences 57, 2, 2004: 341-77
- Moser, Nora B.: Compiler method of automatic programming, in: Proc. Symposium Automatic Programming Digital Computers, Office of Naval Research, Dept. of the Navy: Washington D.C. 1954: 15-21
- Moss, S. J.; Francis, P. N.; Johnson, D. G.: Calculation and parameterization of the effective radius of ice particles using aircraft data, in: Proc. 12th Int. Conf. on Clouds and Precipitation, Zurich, Switzerland, Int. Commission on Clouds and Precipitation and Int. Assoc. of Meteorology and Atmospheric Science, 1996: 1255-1258
- MPI Met: Aufbruch in eine neue Rechenzentrumsgeneration, Tätigkeitsbericht des Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg 2008, Elektronische Ressource: MPI Met, URL: <http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/jahrbuch/2009/dkrz/forschungsSchwerpunkt/pdf.pdf>
- Munk, Max M.: Fundamentals of Fluid Dynamics for Aircraft Designers, The Ronald Press Company: New York 1929
- Murakami, M.: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud – the 19 July 1981 CCOPE cloud, in: Journal of the Meteorological Society of Japan 68, 1990: 107-128
- Murphy, Allan H.: The Early History of Probability Forecasts: Some Extensions and Clarifications, in: Weather and Forecasting 13, 1998: 5-15

- Nagel, Wolfgang E. (Hrsg.): Partielle Differentialgleichungen, Numerik und Anwendung, Manuskripte der Vorlesungen der Sommerschule vom 2. bis 6. September 1996, Forschungszentrum Jülich, Bd. 18, 1996
- NCAR National Center for Atmospheric Research: Homepage, 2009, URL: <http://www.ncar.ucar.edu/>
- NCDC/NOAA National Climate Data Center/ National Oceanic and Atmospheric Administration 2009: Ice Core Data Search, Homepage, 2009, URL: http://hurricane.ncdc.noaa.gov/pls/paleo/fm_createpages.icecore
- NCEP/NCAR NCEP National Center for Environmental Modeling / NCAR National Center for Atmospheric Research: Reanalysis, 2009, URL: <http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis/>
- Nebeker, Frederik: Calculating the Weather. Meteorology in the 20th Century, Academic Press: San Diego 1995
- Neunzert, Helmut: Mathematik und Computersimulation: Modelle, Algorithmen, Bilder, in: Braitenberg, Hosp 1995: 44-53
- Neumann, John von; Morgenstern, Oskar: Theory of Games and Economic Behavior, Princeton University Press: Princeton 1944
- Neumann, John von: Collected Works, Bd. 5: Design of Computers, Theory of Automata and Numerical Analysis (herausgegeben von A. H. Taub), Pergamon Press: Oxford 1963
- Neumann, John von: Numerical Calculation of Flow Problems, 1948, in: von Neumann 1963: 665-711
- Neumann, John von: The general and logic Theory of Automata, 1951, in: von Neumann 1963: 288-328
- Neumann, John von: Entwicklung und Ausnutzung neuerer mathematischer Maschinen, 1954, in: von Neumann 1963: 248-268
- Neumann, John von; Richmyer, Richard D.: On the Numerical Solution of Partial Differential Equations of Parabolic Type, 1947, in: von Neumann 1963: 652-663
- Neumann, John von; Burks, Arthur W.: Theory of self-reproducing automata, University of Illinois Press: Urbana 1966
- Napier, John: Mirifici logarithmorum canonis descriptio ejusque usus in utraque trigonometria etc., Edinburgh 1614, (übersetzt von William Rae Macdonald), The Construction of the Wonderful Canon Of Logarithms, W. Blackwood & Sons: Edinburgh, London, 1889
- Navier, Claude-Louis: Memoire sur les lois du mouvement des fluides, in: Mem. Acad. Sci. Inst. France 6, 1822: 389-440
- Neuroth, Heike; Kerzel, M.; Gentzsch, W. (Hrsg.): Die D-Grid Initiative, Universitätsverlag: Göttingen 2007
- Newton, Isaac: The Mathematical Papers of Isaac Newton, 8 Bde., Cambridge Univ. Press: Cambridge 1967-82

- Newton, Isaac: De analysi per aequationes numero terminorum infinitas, 1669, in: Newton, 2. Bd., 1981: 206-247
- Newton, Isaac: De methodis serierum et fluxionum, 1671, The method of fluxions and infinite series: with its application to the geometry of curve-lines, London 1736, Elektronische Ressource: Internet Archive, URL: <http://www.archive.org/details/methodoffluxions00newt>
- Newton, Isaac: Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, London 1687, Elektronische Ressource: Gallica bibliothèque numérique de la Bibliothèque nationale de France, URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3363w>
- NIC John von Neumann-Institut für Computing: Homepage, 2009, URL: <http://www.fz-juelich.de/nic/>
- Nimführ, R.: Die Bedeutung des Drachens für die dynamische Meteorologie und die Wetterprognose, in: Meteorologische Zeitschrift, September 1904: 408-412
- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration: The History of Numerical Weather Prediction, 2009, Elektronische Ressource: NOAA, URL: http://celebrating200years.noaa.gov/foundations/numerical_wx_pred/welcome.html#create
- Öllien, Frank: Algorithmen und Applikationen zur interaktiven Visualisierung und Analyse chemiespezifischer Datensätze, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002
- Palmen, E.: Meridional circulations and the transfer of angular momentum in the atmosphere, in: J. Meteor. (Correspondence) 6, 1949: 429-430
- Pearl, Judea: Bayesian Networks: A Model of Self-Activated Memory for Evidential Reasoning, in: (UCLA Technical Report CSD-850017) Proceedings of the 7th Conference of the Cognitive Science Society, University of California, Irvine, CA. 1985: 329-334, Elektronische Ressource: University of California, Irvine, URL: http://ftp.cs.ucla.edu/tech-report/198_-reports/850017.pdf
- Pearl, Judea: Causality: Models, Reasoning, and Inference, Cambridge University Press: Cambridge 2000
- Petersen, Arthur C.: Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Simulation Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice, Het Spinhuis Publishers: Apeldoorn, Antwerpen 2006
- Pfeffer, R.L. (Hrsg.): Dynamics of Climate. The Proceedings of a Conference on the Application of Numerical Integration Techniques to the Problem of General Circulation, held October 26-28, 1955, Pergamon: Oxford 1960
- Phillips, Norman: A simple three-dimensional model for the study of large-scale extratropical flow patterns, in: J. Meteor. 8, 1951: 381-394
- Phillips, Norman: The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment, in: Quart. J. Roy. Meteorol. Soc 82, 1956: 132-164

- Phillips, Norman: The Start of Numerical Weather Prediction in the United States, in: *Spekat* 2000: 13-28
- Phillips, Norman: Foreword, in: Randall 2000a: XXVII-XXX
- Phillips, T.J., et al.: Evaluating parameterizations in general circulation models: Climate simulation meets weather prediction, in: *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 85, 2004: 1903-1915
- Piaget, Jean: *Die Entwicklung des Erkennens*, Bd.1, Klett: Stuttgart 1972
- Piaget, Jean: *Einführung in die genetische Erkenntnistheorie*, Suhrkamp: Frankfurt 1973
- PITAC President's Information Technology Advisory Committee: Information Technology Research: Investing in Our Future, Report, 24.02.1999, Elektronische Ressource: PITAC – Report to the President; URL: http://www.nitrd.gov/pitac/report/pitac_report.pdf
- Planck, Max: Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung, in: *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft* 2, 1900: 202-204
- Planck, Max: Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, Vortrag 1900, in: *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft* 2, 1900a: 237-245
- Planck, Max: *Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaft*, Vortrag 1941, J.A. Barth Verlag: Leipzig 1947
- Planck, Max: *Das Weltbild der neuen Physik*, J.A. Barth Verlag: Leipzig, 1947a
- Poincaré, Henri: Sur le problème des trois corps, 1889, in: *Bulletin Astronomique*, I, 8, 1891: 12-24
- Poincaré, Henri: *La science et l'hypothèse*, Paris 1902, Wissenschaft und Hypothese, Teubner: Leipzig 1904
- Poincaré, Henri: *Science et Méthode*, Paris 1908, Wissenschaft und Methode, Teubner: Leipzig 1914 (Nachdruck) Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1973
- Polya, George: *Mathematics and Plausible Reasoning*, Princeton University Press: Princeton 1954
- Poovey, Mary: *A History of the Modern fact. Problems of Knowledge in the Sciences of Wealth and Society*, The University of Chicago Press: Chicago, London 1998
- Popper, Karl: *Logik der Forschung*, 1935, 9. Aufl., J.C.B. Mohr: Tübingen 1989
- Porter, Theodore M.: *Trust in Numbers. The Pursuit of Objectivity in Science and Public Life*, 2. Aufl., Princeton University Press: Princeton 1996
- PRACE Partnership for Advanced Computing in Europe: Homepage, 2009, URL: <http://www.prace-project.eu/>

- PRACE: Memorandum of Understanding signed for the Partnership for Advanced Computing in Europe, 17.04.2007, Elektronische Ressource: PRACE, URL: <http://www.prace-project.eu/news/memorandum-of-understanding-signed-for-the-partnership-for-advanced-computing-in-europe-prace>
- PRISM Programme for Integrated Earth System Modelling: Homepage, 2009, URL: <http://www.prism.enes.org/>
- Pruppacher, H. R.; Klett, J. D.: Microphysics of Clouds and Precipitation, D. Reidel Publishing Company: Amsterdam 1978
- Prusinkiewicz, Przemyslaw; Lindenmayer, Aristid: The Algorithmic Beauty of Plants, Springer: New York 1990
- Ptolemäus, Claudius: Almagest, 150 n. Chr., Elektronische Ressource: Rare Book Collection, Vienna University Observatory, URL: <http://www.univie.ac.at/hwastro/>
- Radder, Hans (Hrsg.): The Philosophy of Scientific Experimentation, University of Pittsburg Press: Pittsburg 2003
- Rammert, Werner; Schulz-Schaeffer, Ingo (Hrsg.): Können Maschinen handeln? Soziologische Beiträge zum Verhältnis von Mensch und Technik, Campus: Frankfurt 2002
- Randall, David A. (Hrsg.): General Circulation Model Development, Academic Press: San Diego 2000
- Reichle, Ingeborg; Siegel, S.; Spelten, A. (Hrsg.): Visuelle Modelle, Fink: München 2008
- Reid, Elliot G.: Standardization Tests of NACA No. 1 Wind Tunnel, NACA-Report No. 195, 1925, Elektronische Ressource: National Advisory Committee for Aeronautics, URL: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1925/naca-report-195.pdf>
- Reynolds, Osborn: Papers on Mechanical and Physical Subjects, 1. Bd. 1869-1882, Cambridge University Press: Cambridge 1900
- Reynolds, Osborn: On Vortex Motion, 1877, in: Reynolds 1900: 184-192
- Reynolds, Osborn: On Various Forms of Vortex Motion, 1877a, in: Reynolds 1900: 183
- Rheinberger, Hans-Jörg; Hagner, M.; Wahrig-Schmidt, B. (Hrsg.): Räume des Wissens. Repräsentation, Codierung, Spur, Akademie-Verlag: Berlin 1997
- Rheinberger, Hans-Jörg: Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas, Wallenstein: Göttingen 2002
- Rhiel, H.; Alaka, M.; Jordan, C.; Renard, R.: The Jet Stream, Meteorological Monography 7, American Meteorological Society 1954
- Rice University: Center for Computational Geophysics, 2009 URL: <http://earthscience.rice.edu/ccg.cfm>
- Richardson, Fry Lewis: Weather Prediction by Numerical Process, Cambridge Univ. Press: Cambridge 1922

- Ries, Adam: Rechnen auff der linihen, 1. Rechenbuch, Erfurt 1518
- Roberts, Michael: The Modern Mind, The Macmillan Company: London 1937
- Roche, John: The Mathematics of Measurement. A Critical History, Athlone Press: London 1998
- Roeckner, Erich: Allgemeine Zirkulationsmodelle, Atmosphäre, in: Promet 29, 2003: 6-14
- Roeckner, Erich; et. al.: The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5. Model description, Report No. 349, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg 2003. Elektronische Ressource: MPI-Met, URL: http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_349.pdf
- Rohrlich, Fritz: Computer Simulation in the Physical Sciences, in: Fine, Frobes, Wessels 1991: 507-518
- Rolle, Robert: Homo Oeconomicus: Wirtschaftsanthropologie in philosophischer Perspektive, Königshausen & Neumann: Würzburg 2005
- Rosenblatt, Bruce: The Successors to FORTRAN – Why Does FORTRAN Survive?, in: IEEE Annals of the History of Computing 6, 1, 1984: 39-40
- Rosenblatt, Frank: The perceptron. A probabilistic model for information storage and organization in the brain, in: Psychological Reviews 65, 1958: 386-408
- Rosenbluth, Arturo; Wiener, Norbert: The Role of Models in Science, in: Philosophy of Science 12, 4, 1945: 316-321
- Rossby, Carl-Gustav: The theory of atmospheric turbulence. A historical resumé and an outlook, in: Mon. Weather Rev. 55, 1927: 1-5
- Rossby, Carl-Gustav: Letter to F. W. Reichelderfer, 16. April 1946, in: John von Neumann: Papers, Box 15, F7, Elektronische Ressource: Manuscript Division, Library of Congress, Washington, D.C. 1994, URL: <http://www.loc.gov/rr/mss/text/vonneumn.html>
- Rotsteyn, L. D.: A physically based scheme for the treatment of stratiform precipitation in large-scale models. I: Description and evaluation of the microphysical processes, in: Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 123, 1997: 1227-1282
- Rozenberg, Grzegorz; Salomaa, Arto: The Mathematical Theory of L-Systems, Academic Press: New York 1980
- Rubbia, Carlo et al.: Report on the EEC Working Group on High Performance Computing, Commission of the European Communities, April 1991
- Runge, Carl D.; König, Hermann: Vorlesung über numerisches Rechnen, Springer: Berlin 1924
- Runge, Carl D.: Indirekte Vergleichung oder Messung, in: Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen, Bd.5, Teubner: Leipzig 1902: 3-24, Elektronische Ressource: GDZ Göt-

- tinger Digitalisierungszentrum, URL: http://gdz.sub.uni-goettingen.de/no_cache/dms/load/img/?IDDOC=189504
- Sachs, Julius: Geschichte der Botanik vom 16. Jahrhundert bis 1860, Oldenbourg: München 1875, Elektronische Ressource: GDZ Göttinger Digitalisierungszentrum, URL: http://gdz.sub.uni-goettingen.de/no_cache/dms/load/img/?IDDOC=240152
- SACADA Synoptic Analysis of Chemical Constituents by Advanced Satellite Data Assimilation: Homepage, 2009, URL: http://www.eurad.uni-koeln.de/index_e.html/?forschung/projekte/sacada_ver_e.html
- Saltzman, Barry (Hrsg.): Theory of Climate, Academic Press: New York 1983
- SCAI Institute for Algorithms and Scientific Computing: Progress-Report, St. Augustin 1998
- Schmandt-Besserat, Denise: Before Writing, I. From Counting to Cuneiform. II. A Catalogue of Near Eastern Tokens, Univ. of Texas Press: Austin 1992
- Schmauß, August: Das Wetterproblem der Wettervorhersage, Akademische Verlagsgesellschaft: Leipzig 1942
- Schmidt, Jan C.: Instabilität in Natur und Wissenschaft, de Gruyter: Berlin, New York 2008
- Schneider, Pablo; Wedell, Moritz: Grenzfälle. Transformationen von Bild, Schrift und Zahl, VDG: Weimar 2004
- Schramm, Helmar; Schwarte, L., Lazardig, J. (Hrsg.): Spektakuläre Experimente. Praktiken der Evidenzproduktion im 17. Jahrhundert, de Gruyter: Berlin, New York 2006
- Schramm, Helmar: Einleitung. Kunst des Experimentellen, Theater des Wissens, in: Schramm, Schwarte, Lazardig 2006: 1-9
- Schüling, Hermann: Die Geschichte der axiomatischen Methode im 16. und beginnenden 17. Jahrhundert, Olms: Hildesheim, New York 1969
- Schulte, Joachim; McGuinness Brian (Hrsg.): Einheitswissenschaft, Suhrkamp: Frankfurt 1992
- Schultz, Carl Heinrich: Natürliches System der Pflanzen, August Hirschwald Verlag: Berlin 1832
- Seck, Friedrich (Hrsg.): Wilhelm Schickard: 1592-1635; Astronom, Geograph, Orientalist, Erfinder der Rechenmaschine, Mohr: Tübingen 1978
- Shackley, S.; Risbey, J.; Stone, P.; Wynne, B.: Adjusting to Policy Expectations in Climate Change Modeling, in: Climatic Change 43, 1999: 413-454
- Shapiro, M. A.; Gronas, S. (Hrsg.): The Life Cycles of Extratropical Cyclones, Amer. Met. Soc.: Boston 1999
- Sillmann, Jana: Regionale Klimamodellierung. Wetterlagenklassifikation auf Basis des globalen Atmosphärenmodells ECHAM, Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg, 2003

- Sismondo, Sergio; Gissis, Snait (Hrsg.): Practices of Modeling and Simulation, Special Issue, Science in Context 12, 2, 1999
- Sismondo, Sergio: Editor's Introduction: Models, Simulations, and their Objects, in: Science in Context 12, 2, 1999: 247-60
- Skodvin, T.: Structure and Agent in the Scientific Diplomacy of Climate Change. An Empirical Case Study of Science-Policy Interaction in the Intergovernmental Panel on Climate Change, Kluwer Academic: Dordrecht 2000
- Smagorinsky, Joseph: On the numerical integration of the primitive equations of motion for baroclinic flow in a closed region, in: Monthly Weather Rev. 86, 1958: 457-466
- Smagorinsky, Joseph: The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modeling: early recollections, in: Saltzman 1983: 3-38
- Smith, Adam: An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations, 1776 (Nachdruck) Collier: New York 1902, Elektronische Ressource: Internet Archive, URL: <http://www.archive.org/details/wealthofnations00smituoft>
- Soentgen, Jens; Reller, Armin (Hrsg.): CO₂ – Lebenselixier und Klimakiller, Ökom: München 2009
- Softguide: Homepage, Aktuelle Marktübersicht – Software für Simulation, 2009 URL: <http://www.softguide.de/software/simulation.htm>
- Spekat, Arne (Hrsg.): 50 Years Numerical Weather Prediction, Deutsche Meteorologische Gesellschaft: Berlin 2000
- Spiegel: Bombe im Rechner, Der Spiegel, Heft 3, 1965: 115-116
- Sprat, Thomas (Hrsg.): The History of the Royal Society Of London. For the Improving of Natural Knowledge, London 1667: 173-179, (herausgegeben von Jackson I. Cope, H. Whitmore Jones), Washington Univ. Studies: St. Louis 1959
- SRES Special Report on Emissions Scenarios: IPCC 2000, Elektronische Ressource: IPCC, <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>
- Stanford Encyclopedia of Philosophy: Models in Science, Februar 2006, Elektronische Ressource: Stanford Encyclopedia of Philosophy, URL: <http://plato.stanford.edu/entries/models-science/>
- Star, Susan Leigh; Bowker, Geoffrey C.: Sorting Things Out: Classification and Its Consequences, MIT Press: Cambridge 2000
- Stichweh, Rudolf: Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen: Physik in Deutschland 1740-1890, Suhrkamp: Frankfurt 1984
- Stokes, George G.: Mathematical and Physical Papers, Vol. I, Cambridge University Press: Cambridge 1880
- Stokes, George G.: On the theories of the internal friction of fluids in motion, 1845, in: Stokes 1880: 75-115

- Stokes, George G.: Report on recent researches in hydrodynamics, 1846, in: Stokes 1880: 157-187
- Storch, Hans von; Güss, S.; Heimann, M.: Das Klimasystem und seine Modellierung, Springer: Berlin 1999
- Strätling, Susanne; Witte, Georg (Hrsg): Die Sichtbarkeit der Schrift, Fink: München 2006
- Sturlese, Loris: Die deutsche Philosophie des Mittelalters. Von Bonifatius bis zu Albert dem Großen (748-1280), Beck: München 1993
- Sundberg, Mikaela: Making Meteorology: Social Relations and Scientific Practice, Stockhol Studies in Sociology 25, Stockholm 2005
- Suppes, Patrick; Zinnes, Joseph L.: Basic Measurement Theory, in: Luce, Bush, Galanter 1963: 1-76
- Tetens, Holm: Experimentelles Handeln, Meiner: Hamburg 1987
- Thornton, Peter E.; et al.: Archiving Numerical Models of Biogeochemical Dynamics, in: Eos Trans. AGU 86, November 2005: 431-432
- Tompkins, A.: A prognostic parameterization for the subgrid-scale variability of water vapor and clouds in large-scale models and its use to diagnose cloud cover, in: J. Atmos. Sci. 59, 2002: 1917-1942
- Top500 Supercomputer Site: Ranking, Juni 2009, URL: <http://www.top500.org>
- Torricelli, Evangelista: De motu gravium naturaliter descendentium, Florenz 1644
- Turing, Alan M.: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, 1936, in: Davis 1964: 115-153
- Turkle, Sherry: Life on the Screen: Identity in the Age of the Internet, Simon & Schuster: New York 1995
- Ulam, Stanisław: Collection of Mathematical Problems, Interscience Publishers: New York 1960
- Ulam, Stanislav M.: Von Neumann: The Interaction of Mathematics and Computing, in: Metropolis, Howlett, Rota 1980: 93-99
- UNICORE Uniform Interface to Computing Resources: Homepage, 2009, URL: <http://www.unicore.eu/>
- Vec, Miloš: Recht und Normierung in der industriellen Revolution: Neue Strukturen der Normsetzung in Völkerrecht, staatlicher Gesetzgebung und gesellschaftlicher Selbstnormierung, Vittorio Klostermann: Frankfurt 2006
- Vega, Juri: Thesaurus Logarithmorum Complectus, Leipzig 1794
- Vieta, Francois: Opera mathematica, in unum volumen congesta, ac recognita, opera atque studio Francisci Schooten, Elsevier: Leiden 1664
- Vogl, S.: Die Physik des Roger Bacons, Erlangen 1904
- Voss, Martin (Hrsg.): Der Klimawandel. Sozialwissenschaftliche Perspektiven, Wiesbaden: VS-Verlag 2008

- Warnke, Philine: Computersimulation und Intervention, Doktorarbeit an der Technischen Universität Darmstadt, 2002, Elektronische Ressource: TU Darmstadt, URL: <http://elib.tudarmstadt.de/diss/000277>
- WCP World Climate Programme: Homepage, 2009, URL: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/index_en.html
- WCRP World Climate Research Programme: Homepage, 2009, URL: <http://wcrp.wmo.int>
- WDC World Data Center: Homepage, 2009, URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/wdc/>
- WDC World Data Center for Paleoclimatology: Homepage, 2009, URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/paleo.html>
- WDCC World Data Center for Climate: Homepage, 2009, URL: <http://www.mad.zmaw.de/wdc-for-climate/>
- Weber, Wilhelm: Werke, 3 Bde., Springer: Berlin 1893
- Weber, Wilhelm: Elektrodynamische Maßbestimmungen. Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung (1846), in: Weber, 3. Bd., 1893: 25-214
- Wege, Klaus; Winkler, Peter: The Societas Meteorologica palatina (1780-1795) and the very First Beginnings of Hohenpeissenberg Observatory, in: Emais, Lüdecke 2005: 45-54
- Weisberg, Michael: Who is a modeller?, in: British Journal of Philosophy of Science 58, 2007: 207-233
- Weyprecht, Carl: Fundamental Principles of Scientific Arctic Investigation, Vortrag zur 48. Versammlung der Deutschen Naturforscher und Ärzte, Graz 18. September 1875, Elektronische Ressource: SCAR Scientific Committee on Antarctic Research, URL: http://www.scar.org/ipy/Weyprecht_Graz_1875.pdf
- Whittaker, Edmund T.; Robinson, George: The Calculus of Observations: A Treatise on Numerical Mathematics, 4. Aufl., Dover: New York 1967
- Winsberg, Eric: Simulation and the Philosophy of Science: Computationally Intensive Studies of Complex Physical Systems, Dissertation an der Indiana University Bloomington, 1999
- Winsberg, Eric: Sanctioning Models: The Epistemology of Simulation, in: Science in Context 12, 2, 1999: 275-292
- Winsberg, Eric: The Hierarchy of Models in Simulation, in: Magnani, Nersessian, Thagard 1999a: 255-269
- Winsberg, Eric: Simulations, Models, and Theories: Complex Physical Systems and their Representations, in: Philosophy of Science 68 (Proceedings), 2001: 442-454
- Winsberg, Eric: Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World, in: Philosophy of Science 70, 2003: 105-125

- Wittum, Gabriel: Mehrgitterverfahren. Effiziente Löser für partielle Differentialgleichungen, Vortrag gehalten zur Jahrestagung der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, Universität Ulm 1995
- Wissenschaftsrat: Stellungnahme zum Verein zur Förderung eines Deutschen Forschungsnetzes e.V., Drs. 5356/02, 12.7.2002, Elektronische Ressource: Wissenschaftsrat.de, URL: <http://www.wissenschaftsrat.de/texte/5356-02.pdf>
- WMO World Meteorological Organisation: Introduction to GRIB Edition 1 and GRIB Edition 2, Juni 2003, Elektronische Ressource: WMO, URL: http://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOCodes/Guides/GRIB/Introduction_GRI_B1-GRIB2.pdf
- WMO World Meteorological Organisation: Homepage, 2009, URL: <http://www.wmo.int>
- Wundt, Wilhelm: Logik. Eine Untersuchung der Prinzipien der Erkenntnis und der Methoden wissenschaftlicher Forschung, 2 Bde., Allgemeine Methodenlehre, 2. Bd., Enke: Stuttgart 1894, Elektronische Ressource: GDZ Göttinger Digitalisierungszentrum, URL: http://gdz.sub.uni-goettingen.de/no_cache/dms/load/img/?IDDOC=299505
- Zadeh, Lotfi A.: Fuzzy Sets, in: Information and Control 8, 1965: 338-353, Elektronische Ressource: UC Berkeley, URL: <http://www-bisc.cs.berkeley.edu/Zadeh-1965.pdf>
- Zadeh, Lotfi A.: Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing, in: Communications of the ACM 37, 3, 1994: 77-84
- Zuse, Konrad: Kommentar zum Plankalkül, in: Berichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, St. Augustin, Nr. 63, Teil 2, 1972: 36ff
- Zuse, Horst: Homepage zu Konrad Zuse und die Zuse KG, 2008, URL: <http://www.horst-zuse.homepage.t-online.de/>

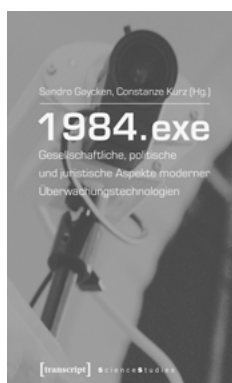
Letzter Aufruf aller URLs: August 2009

Science Studies



NICHOLAS ESCHENBRUCH,
VIOLA BALZ,
ULRIKE KLÖPPEL,
MARION HULVERSCHEIDT (Hg.)
Arzneimittel des 20. Jahrhunderts
Historische Skizzen von Lebertran
bis Contergan

Oktober 2009, 344 Seiten,
kart., zahlr. Abb., 19,80 €,
ISBN 978-3-8376-1125-0



SANDRO GAYCKEN,
CONSTANZE KURZ (Hg.)
1984.exe
Gesellschaftliche, politische und
juristische Aspekte moderner
Überwachungstechnologien
(2., unveränderte Auflage 2009)

2008, 310 Seiten, kart., 29,80 €,
ISBN 978-3-89942-766-0



BERND HÜPPAUF,
PETER WEINGART (Hg.)
Frosch und Frankenstein
Bilder als Medium der Popularisierung
von Wissenschaft

Januar 2009, 462 Seiten, kart.,
zahlr. z.T. farb. Abb., 32,80 €,
ISBN 978-3-89942-892-6

Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten
finden Sie unter www.transcript-verlag.de

Science Studies

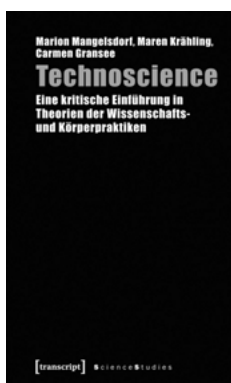


GESINE KRÜGER, RUTH MAYER,
MARIANNE SOMMER (Hg.)

»Ich Tarzan.«

Affenmenschen und Menschenaffen
zwischen Science und Fiction

2008, 184 Seiten, kart.,
zahlr. Abb., 22,80 €,
ISBN 978-3-89942-882-7



MARION MANGELSDORF,

MAREN KRÄHLING,

CARMEN GRANSEE

Technoscience

Eine kritische Einführung in Theorien
der Wissenschafts- und Körperpraktiken

Februar 2010, ca. 150 Seiten,
kart., ca. 13,80 €,
ISBN 978-3-89942-708-0



PHILIPPE WEBER

Der Trieb zum Erzählen

Sexualpathologie und Homosexualität,
1852-1914

2008, 382 Seiten, kart., 29,80 €,
ISBN 978-3-8376-1019-2

Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten
finden Sie unter www.transcript-verlag.de

Science Studies

RALF ADELMANN,
JAN FRERCKS,
MARTINA HESSLER,
JOCHEN HENNIG

Datenbilder

Zur digitalen Bildpraxis in den
Naturwissenschaften

Juni 2009, 224 Seiten, kart.,
zahlr. z.T. farb. Abb., 25,80 €,
ISBN 978-3-8376-1041-3

KAI BUCHHOLZ
**Professionalisierung der
wissenschaftlichen
Politikberatung?**

Interaktions- und
professionssoziologische
Perspektiven

2008, 240 Seiten, kart., 25,80 €,
ISBN 978-3-89942-936-7

MICHAEL EGGERS,
MATTHIAS ROTHE (HG.)
**Wissenschaftsgeschichte als
Begriffsgeschichte**

Terminologische Umbrüche im
Entstehungsprozess der
modernen Wissenschaften

Mai 2009, 274 Seiten, kart., 27,80 €,
ISBN 978-3-8376-1184-7

HEINER FANGERAU,
THORSTEN HALLING (HG.)
Netzwerke

Allgemeine Theorie oder
Universalmetapher in den
Wissenschaften? Ein
transdisziplinärer Überblick

August 2009, 296 Seiten,
kart., zahlr. Abb., 27,80 €,
ISBN 978-3-89942-980-0

WILFRIED HEINZELMANN

Sozialhygiene als Gesundheitswissenschaft

Die deutsch/deutsch-jüdische
Avantgarde 1897-1933. Eine
Geschichte in sieben Profilen

Oktober 2009, 430 Seiten,
kart., zahlr. Abb., 29,80 €,
ISBN 978-3-8376-1144-1

JOCHEN HENNIG

Bildpraxis

Visuelle Strategien in
der frühen Nanotechnologie

März 2010, ca. 338 Seiten, kart.,
zahlr. z.T. farb. Abb., ca. 32,80 €,
ISBN 978-3-8376-1083-3

RENA TE MAYNTZ,
FRIEDHELM NEIDHARDT,
PETER WEINGART,
ULRICH WENGENROTH (HG.)

Wissensproduktion und Wissenstransfer

Wissen im Spannungsfeld
von Wissenschaft, Politik
und Öffentlichkeit

2008, 350 Seiten, kart., 29,80 €,
ISBN 978-3-89942-834-6

KATJA PATZWALDT

Die sanfte Macht

Die Rolle der wissenschaftlichen
Politikberatung bei den
rot-grünen Arbeitsmarkt-
reformen

2008, 300 Seiten, kart., 29,80 €,
ISBN 978-3-89942-935-0

GERLIND RÜVE

Scheintod

Zur kulturellen Bedeutung
der Schwelle zwischen Leben
und Tod um 1800

2008, 338 Seiten, kart., 31,80 €,
ISBN 978-3-89942-856-8

**Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten
finden Sie unter www.transcript-verlag.de**